

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação

**Funções de pedotransferência para a estimativa da retenção de água na
bacia hidrográfica do Arroio do Ouro – RS, Brasil**

Rafaela Gamino Tronco

Pelotas, 2020

Rafaela Gamino Tronco

**Funções de pedotransferência para a estimativa da retenção de água na
bacia hidrográfica do Arroio do Ouro – RS, Brasil**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares - UFPel
Co – orientadora: Prof.^a Dr.^a Viviane Santos Silva Terra - UFPel

Pelotas, 2020

Rafaela Gamino Tronco

**Funções de pedotransferência para a estimativa da retenção de água na
bacia hidrográfica do Arroio do Ouro – RS, Brasil**

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico, da Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 06 de março de 2020

Banca examinadora:

Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Orientador)

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria, 1994

Prof^a. Dr^a. Angélica Cirolini – UFPel

Doutora em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014

Prof. Dr. Roberlaine Ribeiro Jorge – UNIPAMPA

Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

Agradecimentos

À Deus, que nos ilumina e nos encoraja a superar momentos difíceis.

À Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em e Pelotas em Recursos hídricos, pela oportunidade de realizar o mestrado e pela qualidade do ensino.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares e minha co-orientadora, Prof.^a Dr.^a Viviane Santos Silva Terra, pela oportunidade, confiança, incentivo, amizade e paciência.

Aos Me. Guilherme, Lukas e ao quase Me. George, pela amizade e auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Solos e Hidrossedimentologia, Anderson, Leandra, Gabriela, Eduarda, Thaís, Victória, Paula, Matheus, Gustavo, Natália, Alessandro e Henri por toda a colaboração e amizade.

Ao Reginaldo Bonczynski, técnico do laboratório, por todo auxílio com as coletas e pelo conhecimento compartilhado.

Aos colegas de pós-graduação, pelos momentos vividos juntos durante esta caminhada.

A todos os meus amigos, em especial ao Henrique Teixeira, por todo o auxílio, incentivo e parceria em todos os momentos.

Aos meus pais, Nára e Claudio, minhas irmãs, Mônica e Bárbara, meus sobrinhos, Helena e Valentim e meu cunhados, Márcio e Newton, pelo amor, incentivo, compreensão e apoio incondicional em todos os momentos.

Ao meu noivo, Osvaldo, pelo apoio, carinho e incentivo.

À todos que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho,
Muito Obrigada!

Resumo

TRONCO, Rafaela Gamino. **Funções de pedotransferência para a estimativa da retenção de água na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro – RS, Brasil.**

Orientador: Gilberto Loguercio Collares. 2020. 63p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

O entendimento das propriedades hídricas dos solos é de fundamental importância para compreender os processos de armazenamento de água e sua disponibilização às plantas. Essas propriedades são de determinação morosa e de custo elevado, sendo as funções de pedotransferência uma alternativa mais fácil e barata para a obtenção dessas informações. Objetivo desse trabalho foi gerar e validar pedofunções para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro. O trabalho foi realizado utilizando-se dados de análises físico-hídricas de solos obtidos através de amostragens, nas camadas de 0-20 e 20-30cm, e de informações pertencentes ao banco de dados do Núcleo de Estudo, Pesquisa e Extensão HidroSedi – NEPE HIDROSEDI, da Universidade Federal de Pelotas. De um total de 267 amostras, foram utilizadas as informações de textura (teor de areia, silte e argila), densidade do solo, porosidade do solo (macro, micro e total), conteúdo de água remanescente (V_0) e conteúdo de água extraído do solo (V_1) a uma tensão de -1kPa, além das informações do conteúdo de água nos potenciais matriciais de 33, -100, -500 e -1500kPa. As variáveis foram submetidas a um teste de correlação e, posteriormente, foram realizadas análises de regressão múltipla para a obtenção das FPTs, utilizando a opção stepwise do programa estatístico Systat®. As FPTs obtidas apresentaram desempenho satisfatório, possibilitando a sua utilização no desenvolvimento da curva de retenção de água no solo para a área da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Palavras-chave: Propriedades físico-hídricas. Potencial matricial. Stepwise.

Abstract

TRONCO, Rafaela Gamino. **Pedotransfer functions for estimating water retention in the watershed of Arroio do Ouro - RS, Brazil**. Advisor: Gilberto Loguercio Collares 2020, 63p. Dissertation (Master in Water Resources), Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

The understanding of soil hydric characteristics is of fundamental importance in order to comprehend the process of storage of water in the ground and its availability to plants. These properties are of slow determination and high cost, being the pedotransfer function (PTFs) an easier and more inexpensive alternative to obtaining information. The objective of this work was to generate and validate pedofunctions to the watershed of "Arroio do Ouro". The work was done using data of water physic analysis of soil gotten through soil collection, in the 0-20 and 20-30cm layers, and from information belonging to the data bank from the Center of Study, Research and Extension HidroSedi, from Federal University of Pelotas. Totalizing 267 samples, information of texture (sand, silt and clay), density of soil, porosity (macro, micro and total), content of remaining water (V_o) and content of extracted water (V_1) from the soils potentials of -1kPa, besides that, information of the content of water at potentials of -33, -100, -500 e -1500kPa were used. The variables were subjected to an interconnection test and afterwards, multiple regression analysis were made to obtain PTFs, using the option stepwise of the statistic program Systat®. The PTFs that were obtained presented a satisfactory development of the water retention curve in soils to the area of watershed of "Arroio do Ouro".

Key-words: Water physic characteristics. Matrix potential. Stepwise.

Lista de Figuras

Figura 1 - Localização bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	22
Figura 2 Localização dos pontos amostrados.....	23
Figura 3 –Variabilidade textural dos solos utilizados para gerar as FPTs na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	31
Figura 4 –Variabilidade textural dos solos utilizados para validar as FPTs na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	34
Figura 5 –Relação 1:1 dos atributos do solo utilizados para gerar e validar as FPTs na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	36
Figura 6 –Relação 1:1 dos atributos do solo utilizados para gerar e validar as FPTs na camada de 20-30cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	37
Figura 7 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -33kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	40
Figura 8 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -100kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	42
Figura 9 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -500kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	43
Figura 10 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -1500kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	45

Figura 11 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -33kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	47
Figura 12 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -100kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	49
Figura 13 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -500kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	50
Figura 14 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -1500kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	52
Figura 15 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -33 a -1500kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	54
Figura 16 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -33 a -1500kPa na camada de 20-30cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	56

Lista de Tabelas

Tabela 01 – Critérios para classificação do desempenho pelo índice c.....	29
Tabela 2 -Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para gerar as funções de pedotransferência da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	32
Tabela 3 -Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para validar as funções de pedotransferência para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	35
Tabela 4 - Correlação de Pearson (r) entre as variáveis preditoras e a umidade retida em diferentes potenciais das amostras utilizadas para gerar as funções de pedotransferência para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	38
Tabela 5 – Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -33kPa na camada de 0-20cm.....	39
Tabela 6 – Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -100kPa na camada de 0-20cm.....	41
Tabela 7 – Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -500kPa na camada de 0-20cm.....	43
Tabela 8 – Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -1500kPa na camada de 0-20cm.....	44
Tabela 9 – Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -33kPa na camada de 20-30cm.....	46

Tabela 10 – Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -100kPa na camada de 20-30cm.....	48
Tabela 11 – Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -500kPa na camada de 20-30cm.....	50
Tabela 12 – Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -1500kPa na camada de 20-30cm.....	51
Tabela 13 – Variação dos dados utilizados para validar as funções de pedotransferência nos potenciais de -33 a -1500kPa na camada de 0-20cm.....	52
Tabela 14 – Erro médio (ME) e erro médio em lâmina de água armazenada (mm) para os diferentes potenciais na camada de 0-20 cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	53
Tabela 15 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para os diferentes potenciais e seus valores percentuais de 1, 3, 7 e 10% para a camada de 0-20cm.....	53
Tabela 16 – Lâmina média de água armazenada, obtidas em laboratório, para o intervalo de -33 a -1500kPa e seus valores percentuais de 1, 3, 7 e 10% para a camada de 0-20cm.....	55
Tabela 17 – Variação dos dados utilizados para validar as funções de pedotransferência nos potenciais de -33 a -1500kPa na camada de 20-30cm.....	55
Tabela 18 – Erro médio (ME) e erro médio em lâmina de água armazenada (mm) para os diferentes potenciais na camada de 20-30cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	55

Tabela 19 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para os diferentes potenciais e seus valores percentuais de 1, 3, 7 e 10% para a camada de 20-30cm..... 56

Tabela 20 – Lâmina média de água armazenada, obtidas em laboratório, para o intervalo de -33 a -1500kPa e seus valores percentuais de 1, 3, 7 e 10% para a camada de 20-30cm..... 57

Sumário

1 Introdução.....	15
1.1Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivo geral.....	16
1.1.2 Objetivo específico.....	16
1.2 Hipótese.....	16
2 Revisão de literatura.....	17
2.1 Atributos físico-hídricos do solo.....	17
2.2Retenção e armazenamento de água no solo.....	19
2.3 Funções de pedotransferência.....	20
3 Material e métodos.....	22
3.1 Descrição da área de estudo.....	22
3.2 Procedimento de coleta e determinação das características físico- hídricas do solo.....	23
3.3 Composição do banco de dados.....	26
3.4 Geração e obtenção das funções de pedotransferência (FPTs).....	26
3.5 Análise de erros.....	27
3.6 Análise de erros para a estimativa da curva de retenção de água.....	30
4 Resultados.....	31
4.1 Variabilidade dos solos da bacia.....	31
4.1.1 Dados de solo utilizados para gerar as funções de pedotransferência.....	31
4.1.2 Dados de solo utilizados para validas as funções de pedotransferência.....	33
4.1.3 Comparação entre os dados utilizados para gerar e validar as funções de pedotransferência.....	36
4.2 Estimativa da retenção de água.....	37
4.2.1 Potencial matricial de -33kPa na camada de 0-20cm.....	39
4.2.2 Potencial matricial de -100kPa na camada de 0-20cm.....	40
4.2.3 Potencial matricial de -500kPa na camada de 0-20cm.....	42
4.2.4 Potencial matricial de -1500kPa na camada de 0-20cm.....	44
4.2.5 Potencial matricial de -33kPa na camada de 20-30cm.....	45

4.2.6 Potencial matricial de -100kPa na camada de 20-30cm.....	47
4.2.7 Potencial matricial de -500kPa na camada de 20-30cm.....	49
4.2.8 Potencial matricial de -1500kPa na camada de 20-30cm.....	50
4.3 Análise de erros das funções de pedotransferência.....	52
4.3.1 Estimativa de retenção de água na faixa de potenciais de -33 a -1500kPa na camada de 0-20cm.....	52
4.3.2 Estimativa de retenção de água na faixa de potenciais de -33 a -1500kPa na camada de 20-30cm.....	54
5 Conclusão.....	58
Referências.....	59

1 Introdução

Conhecer as propriedades hídricas dos solos é de fundamental importância para entender os processos de armazenamento de água e sua disponibilização às plantas. Essas propriedades hidrodinâmicas podem ser descritas pela curva de retenção da água no solo (relação entre a umidade atual e o seu potencial matricial de água no solo). No entanto, a falta de informações acaba dificultando e, em alguns casos, até comprometendo a realização de estudos que visem o entendimento dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas e, conseqüentemente, prejudicando a adequada gestão dos recursos hídricos.

Isso se deve a dificuldade de determinação de características e propriedades dos solos devido ao elevado custo para realização das análises, demanda de tempo e mão-de-obra. Assim, de modo a avançar nesses processos, vários pesquisadores têm proposto modelos matemáticos para estimar a retenção de água, a partir de parâmetros físicos do solo de fácil obtenção. Esses modelos, denominados Funções de Pedotransferência (FPTs), permitem que informações básicas dos solos sejam transformadas em outras, de obtenção mais laboriosa.

No Brasil, inúmeros autores utilizaram FPT para estimar a capacidade de retenção de água, empregando modelos de regressão que correlacionam variáveis físicas do solo, principalmente, a granulometria e a densidade do solo. (SOUZA *et al.*, 2016), tais como Oliveira *et al.*, 2002; Tomasella *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2008; Michelon *et al.*, 2010; Reichert, 2017. Entretanto, a utilização das FPTs já divulgadas para ambientes diferentes daquelas para a qual foram desenvolvidas apresentam diferenças de desempenho, sendo mais adequado a utilização de pedofunções desenvolvidas para dados da área de aplicação ou para uma área com solos semelhantes (NEMES *et al.*, 2010).

Assim, o objetivo central deste trabalho é gerar funções de pedotransferência para determinar a retenção de água no solo, de modo a poder proceder uma futura espacialização do comportamento da água nos demais solos da bacia hidrográfica. A escolha da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro se deu pela sua representatividade como a porção com maior altitude da bacia hidrográfica do Arroio Pelotas, que apresenta propriedades e características específicas, em especial pela origem de formação dos solos e posição na paisagem. Neste sentido,

estudos nessa região permitem que as informações possam ser utilizadas pelos gestores na tomada de decisões necessárias em projetos futuros (BARTELS, 2015).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Gerar, testar e validar as funções de pedotransferência a partir da análise físico-hídrica de amostras de solos da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro para determinar os pontos da curva de retenção de água.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar as características físico-hídrica das amostras de solo coletadas nas camadas de 0-20cm e 20-30cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro;
- Gerar as funções de pedotransferência a partir dos atributos físico-hídricos do solo nos potenciais de -33kPa, -100 kPa, -500kPa e -1500kPa;
- Validar as diferentes funções de pedotransferência desenvolvidas para a determinação dos conteúdos de água nos potenciais -33kPa, -100kPa, -500kPa e -1500kPa;
- Avaliar a acurácia das funções de pedotransferência em lâmina correspondente a estimativa do armazenamento de água no perfil do solo, na faixa de potenciais de -33kPa a -1500kPa.

1.1.3 Hipótese

A partir da determinação das funções de pedotransferência será possível estimar a capacidade de retenção de água para os solos da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

2 Revisão de literatura

2.1 Atributos físico-hídricos do solo

O solo pode ser considerado um sistema trifásico, composto por uma fase sólida, com partículas minerais e orgânicas variadas; a fase líquida, composta pela solução do solo, onde o principal elemento é a água; e a fase gasosa, composta pelo ar (LIMA *et al.*, 2007). É o principal recurso natural em uma bacia hidrográfica, pois proporciona o suporte para toda a cobertura vegetal sem a qual a vida no planeta não seria possível. O termo solo é utilizado para se referir a camada externa e agricultável da superfície terrestre, proveniente da rocha que, através de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, transforma-se em material poroso com características peculiares após o passar de eras geológicas (REICHARDT e TIMM, 2012).

O conhecimento dos atributos físico-hídricos do solo é de fundamental importância para caracterizá-los quanto ao seu uso e manejo, fornecendo informações de extrema relevância no entendimento das interações entre a água e o solo (SOARES, 2018).

Dentre os atributos físicos do solo, a textura se refere a distribuição do tamanho das partículas neste. O total de partículas de um solo, sem levar em consideração a matéria orgânica e as partículas maiores que 2mm, resulta no somatório das frações de areia, silte e argila. A textura é a característica física mais estável, e sua correlação com a superfície específica uma de suas propriedades mais importantes (KLEIN, 2008).

Segundo Bortolini e Albuquerque (2018), entre os vários fatores que afetam a retenção de água no solo, o principal é a sua textura, já que ela determina a área de contato entre a água e as partículas sólidas. Isto é, quanto mais fina ou mais argilosa for a textura, maior tende a ser a superfície de contato disponível para a adesão ou o contato solo-água. Entretanto, não é possível prever para todas as classes de solo a retenção somente a partir da textura, pois existem outros fatores importantes a serem considerados, tais como mineralogia e estrutura (MESQUITA e MORAIS, 2004).

A estrutura do solo está relacionada ao modo como as partículas estão distribuídas, formando o sistema de poros. Essa porosidade, definida como a proporção entre o volume de poros de um solo e o seu volume total, é considerada inversamente proporcional a densidade do solo, estando também relacionada com a textura, estrutura e teor de matéria orgânica do solo (LIBARDI, 2010).

Para melhor caracterizar a porosidade do solo, realiza-se uma divisão dos poros conforme o tamanho, sendo a forma mais usual a classificação em macroporos e microporos. Os macroporos possuem um diâmetro maior que 0,05mm e começam a perder água à tensão de 6kPa, influenciando diretamente a infiltração de água no solo, às trocas gasosas com a atmosfera e o crescimento radicular. Já os microporos são aqueles com diâmetro menor que 0,05mm e são os responsáveis pela retenção de água no solo (HILLEL, 1980).

Determinante na formação da porosidade, a mineralogia explica a ocorrência de poros grandes em solos arenosos, os quais também apresentam baixa porosidade total comparado a solos mais argilosos devido o maior volume de microporos nestes últimos (SOARES, 2018). A distribuição do tamanho de poros afeta a capacidade de armazenamento e o movimento da água no solo. Essa distribuição depende da textura e da estrutura e pode ser obtida através da curva característica de água.

Outro importante atributo a ser considerado na avaliação da qualidade estrutural é a densidade. A densidade do solo é um dos principais fatores físicos que interferem no desenvolvimento de uma cultura, visto que trata-se da relação entre a massa de sólidos e o volume do solo, sendo uma propriedade variável, dependente da estrutura e compactação do solo (SECCO, 2003).

Tal atributo físico é de grande relevância, podendo propiciar informações acerca do seu estado de conservação, especialmente sobre sua influência em propriedades como a infiltração e retenção de água no solo, o desenvolvimento de raízes, trocas gasosas, e a suscetibilidade aos processos erosivos (GUARIZ *et al.*, 2009). Para Costa *et al.* (2003), a densidade tende a aumentar com a profundidade, devido a fatores como o teor reduzido de matéria orgânica, menor agregação, menor penetração de raízes, maior compactação ocasionada pelo peso das camadas subjacentes, diminuição da porosidade total devido à eluviação de argila, dentre outros.

2.2 Retenção e armazenamento de água no solo

Diversos fatores interferem na retenção de água pelo solo, sendo a textura o principal deles, pois ela determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água e as proporções de poros de diferentes tamanhos. Além disso, a estrutura e o tipo de material presente no solo, como alguns tipos de argila e a matéria orgânica também afetam a quantidade de água retida pelo solo (REICHARDT, 2012).

A capacidade do solo em armazenar água, tende a variar consideravelmente em determinada área, principalmente se forem levados em conta os diferentes usos dados ao solo. Essa capacidade de atuar como um reservatório de água, tanto para as plantas como para a recarga de aquíferos e cursos hídricos, só é possível devido aos fenômenos de adsorção e capilaridade.

Na adsorção ocorre a retenção da água como um filme preso a superfície dos sólidos, já na capilaridade a retenção ocorre nos poros capilares do solo, estando sempre associada a uma interface curva água – ar (LIBARDI, 2010). Esses fenômenos ocorrem de maneira concomitante, entretanto, em virtude das diferentes condições de umidade do solo, um deles se sobrepõe ao outro. Quando o teor de água se encontra na faixa de umidade, o fenômeno de capilaridade tem maior expressão; já quando esse teor se encontra baixo, a adsorção domina a retenção de água (HILLEL, 1980; REICHART e TIMM, 2012). Assim, de modo a representar essa relação entre o teor de água no solo e energia com que a mesma está retida nos poros e/ou adsorvida nas partículas minerais do solo, temos a curva de retenção de água (FILHO *et al*, 2015).

A curva de retenção de água no solo representa a relação entre o potencial matricial e o seu conteúdo de água no solo. O potencial matricial, dentre os diferentes potenciais da água (gravitacional, hidráulico, osmótico, térmico e de pressão), é o mais expressivo nas condições onde o solo está parcialmente saturado (LIBARDI, 2010). Em condições de saturação, o potencial matricial não se expressa. Entretanto, ele se acentua à medida que o solo vai secando, tornando-se mais negativo, indicando que a água vai sendo retida com maior energia pela matriz do solo (KLEIN, 2008).

Em geral, temos dois critérios utilizados na literatura para determinar a umidade do solo que são a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A capacidade de campo pode ser considerada como o índice umidade do solo, para uso da plantas, após sua completa saturação e livre drenagem (potencial de -33kPa); ou seja, é o marco superior de umidade do solo após a drenagem de seus macroporos. A estimativa da capacidade de campo mediante o valor da umidade relacionada a um determinado potencial matricial apresenta algumas limitações, porém tem uso justificado pela facilidade e menor tempo para determinação em laboratório (REICHARDT, 1988; VAN LIER, 2000).

O ponto de murcha permanente representa o teor de água disponível às plantas e que está retido sob uma maior tensão matricial, normalmente fixada como -1500kPa . Representa limite inferior de umidade com a qual a planta pode sobreviver. Umidades menores do que a deste limite estão retidas com uma força que a planta já não consegue mais superar, entrando em estado de permanente murcha (REICHARDT, 1988).

Para determinar esse conteúdo de água no solo, a técnica mais usada é a da Câmara de Richards (1965). Essa câmara de pressão, hermeticamente fechada, possui uma placa porosa no seu interior, onde há somente o fluxo de água, não de ar – obedecendo certos limites.

2.3 Funções de pedotransferência

As propriedades hidráulicas do solo, tais como a curva característica da água no solo, são demoradas e caras de se obterem diretamente, portanto várias propostas de metodologias indiretas vem sendo propostas (BAYAT *et al.*, 2019). Neste cenário, surgem as funções de pedotransferência como uma alternativa para a determinação desses dados (MATULA *et al.*, 2007).

Definido por Bouma (1989), o conceito de Função de Pedotransferência significa “transformar os dados que possuímos em dados que precisamos”. Assim, as funções de pedotransferência (FPT) podem ser descritas como equações de regressão ou modelos utilizados para relacionar as propriedades do solo entre si, de modo a permitir a determinação de características mais laboriosas do solo a partir de informações básicas (SALCHOW *et al.*, 1996).

O desenvolvimento e uso dessas funções vem aumentando nos últimos anos, sendo propostas na literatura, só nas últimas três décadas, um número considerável de FPTs com diferentes requisitos de entradas de dados e princípios de modelagem (KAYSER, 2019). Contudo, apesar de largamente utilizadas, Minasmy *et al.* (2003) atentam para a necessidade de se definirem dois princípios básicos para a boa utilização das FPTs. Esses princípios são os da eficiência e da incerteza. O primeiro refere-se a não utilização das funções para predizer propriedades que são mais fáceis e baratas de medir ou determinar. O esforço e o custo envolvido para determinar o preditor deve ser menor do que aquele necessário para obter as informações que se pretendem prever. Já o segundo princípio refere-se a não utilizar as FPTs a menos que se possa analisar a incerteza associada e, caso já exista um conjunto de FPTs para determinado problema, deve ser usada a que possui menor variância.

Segundo Oliveira *et al.* (2002), quanto mais homogêneos forem os solos que compõe a base de dados e mais próximos eles estiverem dos que terão seus dados estimados, mas precisa a FPT deverá ser. As FPTs são aplicadas em modelos de várias escalas, porém a sua utilização deve-se basear em calibrações locais, pois, como constatado por Coelho *et al.* (1998) e Tomasella *et al.* (2003), equações obtidas de outros trabalhos demonstram baixa acurácia na determinação dos dados.

3 Material e métodos

3.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro (Figura 1), localizada entre os municípios de Pelotas e Morro Redondo, na porção Sul do estado do Rio Grande do Sul. Possui uma área de 17,17km² e está inserida na região geomorfológica do Escudo Sul-Rio-Grandense e é considerada uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Arroio Cadeia (BARTELS, 2015), inserida na Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas que tem seu exutório no Canal São Gonçalo.

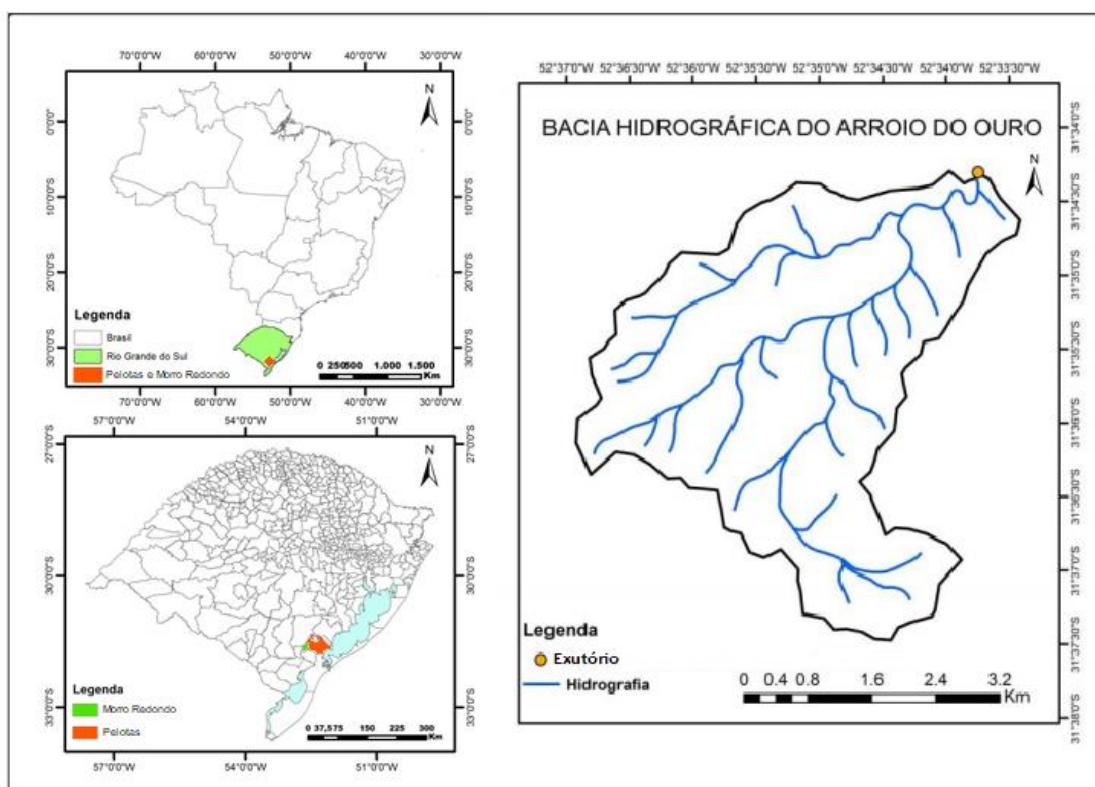


Figura 1 – Localização Bacia Hidrográfica do Arroio do Ouro.

O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen, é do tipo "Cfa", ou seja, temperado úmido com verões quentes. A região possui temperatura e precipitação média anual de 17,13°C e 1.618mm, respectivamente, e umidade relativa média do ar de 75,02% (EMBRAPA, 2018).

Os solos da bacia foram classificados, segundo Cunha *et al.* (1996), em Podzólicos Bruno acinzentados, Podzólicos Vermelho Amarelo, Regossolos e

Litossolos. As classes de solo, reorganizadas de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos de 2006, apresentam para a bacia solos das classes de Neossolos e Argissolos. A principal ocupação da bacia é a agricultura, organizada em pequenas propriedades familiares, onde observa-se o cultivo de pêsego, milho e tabaco, além de atividades de pecuária leiteira e avicultura (SEMA, 2017).

3.2 Procedimento de coleta e determinação das características físico- hídricas do solo

Para realizar a amostragem, foram escolhidos 68 pontos no mapa da bacia, distribuídos sob uma malha irregular. As coordenadas de cada ponto foram colocadas em um GPS de navegação que indicou o local de cada coleta. Devido às adversidades do terreno, alguns pontos foram deslocados para o local mais próximo onde pudesse ser realizado o ensaio, conforme Figura 2.

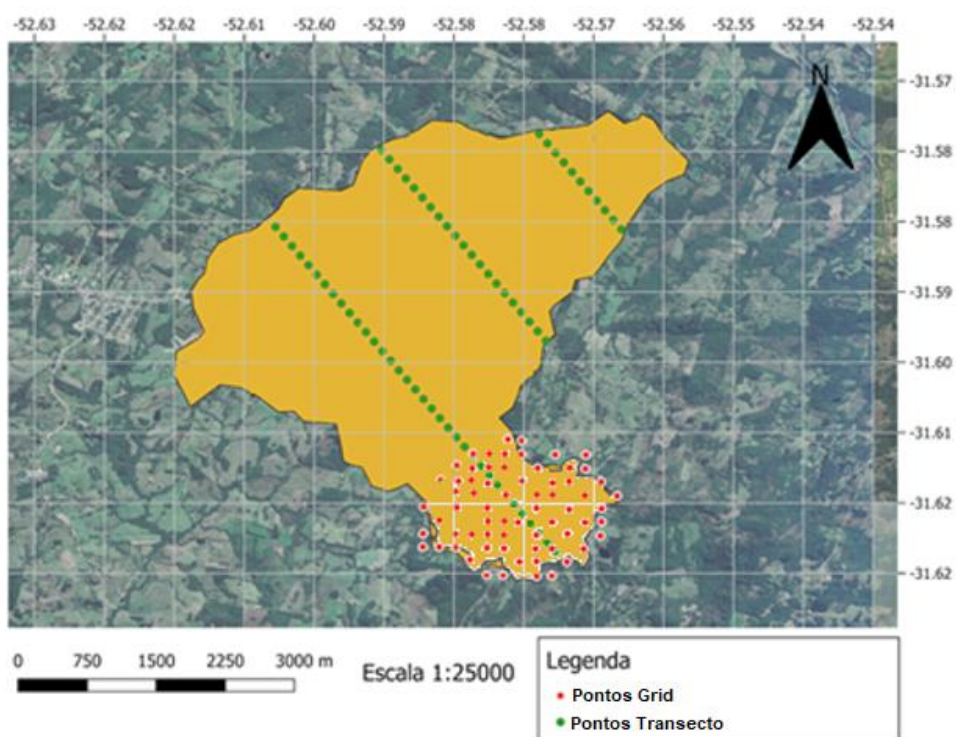


Figura 2 - Localização dos pontos amostrados.

As amostras de solo referenciadas na Figura 2 como “Grid”, foram coletadas entre março de 2017 e janeiro de 2018 na área de estudo; já as amostras que fazem parte dos “Transectos” foram determinadas anteriormente na bacia e que pertencem

ao acervo de dados do Núcleo de Ensino Pesquisa e Extensão – HidroSedi. O adensamento de pontos ao sul da área da bacia foi devido a maior altitude da região (BARTELS, 2015). Para a coleta das amostras foram abertas trincheiras, sendo extraídas nas camadas de 0–20cm e 20–30cm, com estrutura deformada e preservada. Para cada ponto, em cada uma das profundidades, foram coletadas três amostras de estrutura indeformada, com o auxílio de um extrator do tipo Uhland, ao qual foram acoplados cilindros com 7,5cm de altura e diâmetro. Também foram coletados aproximadamente 1.000g de amostra indeformada da porção mediana de cada camada. Após a coleta, as amostras foram identificadas, embaladas e levadas ao Laboratório de Solo e Hidrossedimentologia da Universidade Federal de Pelotas (Pelotas-RS) para serem determinados seus atributos físico-hídricos.

Em laboratório, as amostras indeformadas foram preparadas retirando-se cuidadosamente o excesso de solo da face superior e inferior, tomando como limite as bordas dos cilindros. Para evitar perdas de solo durante o processo de saturação e manuseio das amostras, vedou-se a parte inferior com tecido permeável à água. Já as amostras deformadas foram destorroadas e passadas por peneira de malha com 2mm de abertura para determinação da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

Para determinar a textura do solo, utilizou-se o método da pipeta. Este método, descrito pela Embrapa (1997), serve para determinação a composição granulométrica do solo. Consiste na pipetagem de uma amostra para separação das frações argila e silte e peneiramento para fração areia.

A retenção de água no solo foi calculada conforme o método descrito em EMBRAPA (1997), com adaptações referentes à parte de alta tensão, para as quais se utilizaram câmara de Richards e o psicrômetro WP4. A retenção de água no solo foi medida nas tensões -1, -6,-33 e -100kPa. Para isso, as amostras de solo com estrutura preservada, previamente preparadas, foram saturadas por elevação capilar durante 24 horas e levadas à mesa de tensão para aplicação das tensões de -1 e -6kPa (EMBRAPA, 1997). Para a utilização da metodologia da câmara de Richards, amostras deformadas foram colocadas em anéis de borracha sobre a placa porosa, saturadas e, em seguida, submetidas a tensões de -33 e -100kPa.

A retenção de água nas tensões de -500 e -1500kPa foram medidas através da técnica da psicrometria, com a utilização do aparelho WP4 (Dew Point Potentiometer). Foram realizadas aproximadamente seis repetições, com ampla

faixa de umidade, da qual foram extraídos os valores estimados de umidade volumétrica nas tensões de -500 e -1500kPa.

Para a determinação da densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo, foi empregada “mesa de tensão” (EMBRAPA,1997).

A porosidade total do solo é igual a porcentagem de saturação em volume de solo e foi determinada de acordo com a Equação 1:

$$P_t = \frac{m_{sat} - m_s}{V_t} \quad (1)$$

Em que:

P_t = porosidade total do solo, em %;

m_{sat} = a massa da amostra após a saturação, em g;

m_s = a massa do solo seco em estufa, em g;

V_t = o volume total da amostra, em cm^3 .

A microporosidade é considerada como sendo o conteúdo volumétrico de água retida a uma tensão superior a 6kPa, e foi calculada de acordo com a Equação2:

$$Micro = \frac{m_{6kpa} - m_s}{V_t} \quad (2)$$

Em que:

Micro = microporosidade do solo, em %;

m_{6kPa} = massa da amostra ser submetida a uma tensão de -6kPa, em g;

m_s = massa do solo seco em estufa, em g;

V_t = volume total da amostra, em cm^3 .

A macroporosidade foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, ou seja, conforme a Equação3:

$$Macro = P_t - Micro \quad (3)$$

Em que:

Macro = macroporosidade, em %;

P_t = porosidade total, em %;

Micro= microporosidade, em %.

A densidade do solo foi calculada como o usual, seguindo a Equação4:

$$D_s = \frac{m_s}{V} \quad (4)$$

Em que:

D_s = densidade do solo, em g.cm^{-3} ;

M_s = representa a massa de solo seco em estufa, em g;

V = volume de solo, em cm^3 .

3.3 Composição do banco de dados

Para compor o banco de dados, além dos 68 pontos amostrados, foram acrescentados 67 pontos amostrados anteriormente na bacia (transectos) e que pertencem ao acervo de dados do Núcleo de Ensino Pesquisa e Extensão – HidroSedi. Assim, o banco de dados utilizado foi composto de 262 amostras, sendo 135 na camada de 0-20cm e 127 na camada de 20-30cm. A diferença entre o número de pontos coletados nas camadas foi devido as características do solo de algumas áreas da bacia que, por apresentar solos rasos - característica dos neossolosos – inviabilizou a coleta na camada de 20-30cm.

Dessas amostras foram utilizadas as informações percentuais de areia, argila e silte; densidade do solo, porosidade total (Pt), macroporosidade e microporosidade; conteúdo de água remanescente (V_0) e conteúdo de água extraído do solo (V_1) a uma tensão de -1kPa, além das informações de conteúdo de água remanescente no solo nos potenciais de 0, -1, -6, -33, -100, -500 e -1500kPa.

3.4 Geração e obtenção das funções de pedotransferência (FPTs)

O banco de dados foi dividido em dois conjuntos: um utilizado para gerar as pedofunções, composto por 60% dos dados de cada camada, e o outro para validar os modelos gerados (40% dos dados para cada camada). A análise da variabilidade dos atributos do solo foi realizada através do diagrama textural, da verificação dos valores máximos, mínimos, médios e do desvio padrão em ambos os conjuntos. Já para detectar possíveis divergências entre os dois conjuntos foi realizado, além de

uma relação 1:1 com a análise da dispersão em relação a reta $Y=X$, o teste “t” de amostras independentes.

Para a geração das FPTs, foram organizados os dados do conjunto com 60% do total (para cada camada) dentro do programa Systat®, sendo primeiramente realizada a análise de correlação simples entre cada uma das variáveis preditoras com a umidade para cada um dos diferentes potenciais.

As FPTs foram geradas através das variáveis independentes utilizadas neste estudo, como: densidade do solo (g.cm^{-3}); areia (%); silte (%); argila (%); porosidade total (%); macroporosidade (%); microporosidade (%); V_o ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$); V_1 ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$); relação silte por argila; somatório dos percentuais de silte com areia (%); e de silte com argila (%). Aquelas que apresentaram baixa correlação com as variáveis hídricas preditas foram descartadas na composição dos modelos, permanecendo somente as que exercem maior influência no seu comportamento.

A seguir, foi realizada a análise de regressão múltipla com o auxílio da ferramenta *stepwise* do programa. Essa ferramenta trata-se da combinação de outros dois membros: o “forward selection”, onde o algoritmo progressivamente adiciona novas variáveis ao modelo, iniciando daquela com maior correlação com a resposta; e “backward elimination”, que é o mecanismo de eliminação de variáveis. A cada nova interação, um modelo é construído e seu efeito é avaliado pelo Test-F, sendo incluída na equação a variável com o valor de F maior do que um F-crítico (SOARES, 2013). Assim, obtiveram-se as FPTs para a determinação do conteúdo de água nos potenciais de -33, -100, -500 e -1500kPa, totalizando 8 funções, sendo 4 para cada profundidade.

3.5 Análise de erros

A acurácia das pedofunções foi analisada pela relação 1:1 dos dados observados versus os estimados e por meio de indicadores estatísticos. Os indicadores utilizados foram R^2 , erro médio (ME), raiz quadrada do erro médio (RMSE), porcentagem do viés (PBIAS) e índice de desempenho ou concordância (c).

O R^2 é uma medida de ajustamento do modelo estatístico em relação aos valores observados e tem essa relação melhor explicada quanto mais próximo a 1

for seu valor. O erro médio (ME) serve para indicar a exatidão da estimativa, apontando a tendência da pedofunção para superestimar, caso positivo, ou subestimar, se for negativo, os valores. Quanto mais próximos a 0 forem esses valores, melhor será a precisão do modelo.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i) \quad (5)$$

Em que:

n = número de observações;

e_i = valor estimado pela FPT;

m_i = valor observado da variável de interesse.

A RMSE indica a quantidade da dispersão dos valores medidos e estimados. Quanto mais próximo a 0 for seu valor, melhor será a acurácia do modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i)^2} \quad (6)$$

Em que:

n = número de observações;

e_i = valor estimado pela FPT;

m_i = valor observado da variável de interesse.

O viés (PBIAS), tal como o ME, mensura a propensão dos dados simulados serem super ou subestimados. Valores positivos indicam subestimativa, enquanto valores negativos indicam superestimação. Segundo Van Liew *et al.* (2007), para o PBIAS temos a seguinte classificação: $|PBIAS| < 10\%$, muito bom; $10\% < |PBIAS| < 15\%$, bom; $15\% < |PBIAS| < 25\%$, satisfatório; $|PBIAS| > 25\%$, não satisfatório.

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - e_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (7)$$

Em que:

n = número de observações;

e_i = valor estimado pela FPT;

m_i = valor observado da variável de interesse.

O coeficiente de desempenho (c), na Equação 9, é o produto do índice de correlação (r) e o índice de concordância de Willmott (d), mostrado na Equação 8 (WILLMOTT *et al.*, 1985).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|e_i - M| + |m_i - M|)^2} \quad (8)$$

Em que:

n = número de observações;

e_i = valor estimado pela FPT;

m_i = valor observado da variável de interesse;

M = média dos valores observados.

$$c = r * d \quad (9)$$

Em que:

r = índice de correlação;

d = índice de concordância de Willmott.

Os resultados do índice “ c ” foram interpretados conforme a Tabela 01, proposta por Camargo e Sentelhas (1997).

Tabela 01 – Critérios para classificação do desempenho pelo índice c .

Valores de “ c ”	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,85 a 0,76	Muito bom
0,75 a 0,66	Bom
0,65 a 0,61	Mediano
0,60 a 0,51	Sofrível
0,50 a 0,41	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas, 1997.

Também se estimou os valores de ME em lâmina (mm) (erro médio multiplicado pela profundidade da camada) e a lâmina média para cada potencial (-33, -100, -500 e -1500kPa) (conteúdo de água multiplicado pela profundidade da camada). Esses valores foram comparados nos percentuais de 1, 3, 7 e 10% da lâmina média para determinar em qual faixa o ME se enquadra e qual a sua influência (BARBOZA, 2011).

3.6 Análise de erros para a estimativa da curva de retenção de água no solo

Para avaliar a precisão das pedofunções na estimativa da totalidade da curva de retenção, não somente em pontos específicos, agrupou-se os dados observados e estimados nos potenciais de -33, -100, -500 e -1500 kPa, formando um conjunto com a faixa de -33 a -1500 kPa, como proposto por Barboza (2011). A eficiência foi calculada por meio de indicadores estatísticos R^2 , ME, RMSE, PBIAS e índice c, além da comparação das lâminas médias, nos percentuais de 1, 3, 7 e 10%, com os valores de ME em lâmina (mm).

4 Resultados

4.1 Variabilidade dos solos da bacia

4.1.1 Dados de solo utilizados para gerar as funções de pedotransferência

Percebe-se na Figura 3, que das 161 amostras utilizadas para desenvolver as FPTs, que a maioria se encontra nas faixas de 40 a 80% de areia. Isso se deve ao fato da bacia estar localizada em uma área onde predominam solos dos tipos argissolos e neossolos, que tendem a ser mais arenosos (SANTOS *et al.*, 2018).

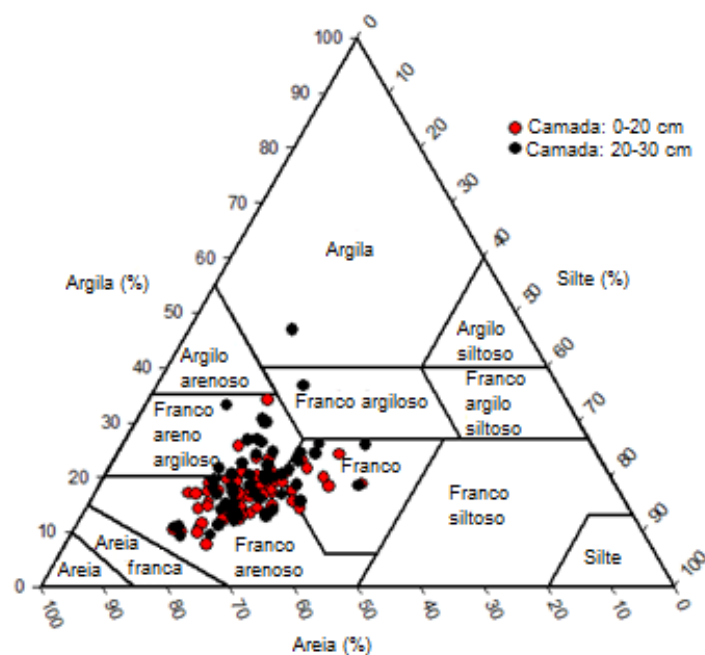


Figura 3 –Variabilidade textural dos solos utilizados para gerar as FPTs na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores mínimos, máximos e médios, além do desvio padrão usados para desenvolver as funções de pedotransferência, para as duas camadas estudadas.

Tabela 2 - Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para gerar as funções de pedotransferência da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Variável	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
Camada 0-20cm				
Ds	1.613	0.986	1.396	0.130
Pt	0.597	0.346	0.444	0.053
Macro	0.412	0.043	0.353	0.100
Micro	0.390	0.057	0.057	0.094
Areia	73.733	38.533	58.446	7.620
Argila	34.036	7.713	16.979	4.555
Silte	41.412	14.909	24.576	5.329
Sil/Arg	2.916	0.556	1.534	0.453
Sil+Areia	92.287	65.964	83.021	4.555
Sil+Arg	61.467	26.267	41.554	7.620
V _o	0.501	0.268	0.369	0.045
V ₁	0.212	0.016	0.060	0.040
θ ₋₃₃	0.359	0.124	0.237	0.048
θ ₋₁₀₀	0.353	0.110	0.222	0.046
θ ₋₅₀₀	0.209	0.056	0.129	0.034
θ ₋₁₅₀₀	0.164	0.039	0.097	0.027
Camada 20-30cm				
Ds	1.644	1.078	1.428	0.104
Pt	0.537	0.321	0.427	0.044
Macro	0.401	0.052	0.225	0.101
Micro	0.427	0.068	0.202	0.020
Areia	73.233	35.750	54.861	8.494
Argila	46.841	9.187	20.333	7.357
Silte	41.075	12.915	24.806	5.343
Sil/Arg	2.336	0.350	1.363	0.481
Sil+Areia	90.813	53.159	79.667	7.357
Sil+Arg	64.250	26.767	45.139	8.494
V _o	0.476	0.197	0.383	0.051
V ₁	0.219	0.014	0.058	0.042
θ ₋₃₃	0.393	0.102	0.238	0.056
θ ₋₁₀₀	0.386	0.095	0.227	0.057
θ ₋₅₀₀	0.245	0.057	0.139	0.040
θ ₋₁₅₀₀	0.213	0.046	0.106	0.035

Onde: Ds – densidade do solo (g.cm^{-3}), Pt – porosidade total (%), Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila (%), Silte – percentual de silte (%), Sil/Arg – relação do percentual de silte pela percentual de argila (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg – soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), V₁ – conteúdo de água extraído do solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ₋₃₃ – umidade do solo a tensão de -33 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ₋₁₀₀ – umidade do solo a tensão de -100 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ₋₅₀₀ – umidade do solo a tensão de -500 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ₋₁₅₀₀ – umidade do solo a tensão de -1500 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

É possível perceber um aumento da densidade média, passando de $1,396 \text{ g.cm}^{-3}$ para $1,428 \text{ g.cm}^{-3}$, conforme o aumento da profundidade. O incremento da densidade pode estar relacionado com a redução da aeração do solo (SILVA *et al.*, 2015). Isso pode ser confirmado pela diminuição dos valores de porosidade total, de 0,444% para 0,427%, e macroporosidade, de 0,353% para 0,225%, com o acréscimo de profundidade. Essa redução se dá devido ao aumento da quantidade de argila do solo que era de 16,979%, na camada de 0-20cm, e sobe para 20,333%, na camada seguinte. Solos com maior quantidade de argila tendem a apresentar maior agregação de suas partículas, que possuem uma porosidade intra-agregados, aumentando o volume do espaço poroso, em especial dos poros com diâmetro reduzido, o que justifica o aumento da microporosidade, de 0,057% para 0,202%, com o aumento da profundidade (BRADY e WEIL, 2008).

Analisando os valores de umidade nos diferentes potenciais, observa-se que os valores de umidade aumentam nas tensões de -500 e -1500kPa, em consequência do incremento da microporosidade que influencia a retenção de água no perfil do solo. Bem como os valores de V_0 aumentaram com a profundidade, enquanto os valores de V_1 diminuíram, também devido ao aumento da microporosidade, concordando com o encontrado por Barboza (2011).

4.1.2 Dados de solo utilizados para validar as funções de pedotransferência

As amostras utilizadas para validar as FPTs, 106, encontram-se nas faixas de 40 a 80% de areia, mantendo similaridade ao encontrado nas amostras utilizadas para gerar as funções, estando a maior parte situada nas classes franco-argilo-arenosa, franco arenosa e franca.

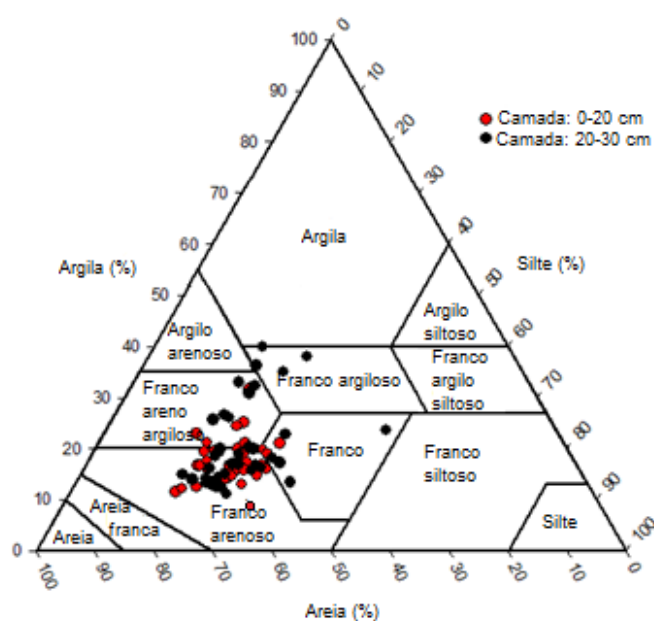


Figura 4 –Variabilidade textural dos solos utilizados para validar as FPTs na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores mínimos, máximos e médios, além do desvio padrão, usados para validar as pedofunções nas camadas de 0-20cm e 20-30cm.

Nota-se um aumento da microporosidade, de $0,206\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para $0,213\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, bem como um acréscimo do percentual de argila no solo com o aumento da profundidade. Solos com essa característica tem uma maior agregação das partículas, acrescendo o volume do espaço poroso, principalmente dos poros com menor diâmetro (BRADY e WEIL, 2008). Os valores de umidade nos diferentes potenciais, bem como de V_1 e V_0 , seguiram o mesmo comportamento dos dados utilizados para gerar as FPTs.

Tabela 3 - Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para validar as funções de pedotransferência para a bacia hidrográfica do arroio do Ouro.

Variável	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
Camada 0-20cm				
Ds	1.608	0.938	1.424	0.125
Pt	0.574	0.346	0.434	0.044
Macro	0.371	0.056	0.226	0.100
Micro	0.456	0.058	0.206	0.105
Areia	70.450	27.983	57.385	6.972
Argila	31.581	7.548	17.988	4.804
Silte	48.863	15.677	24.627	5.390
Sil/Arg	4.103	0.646	1.471	0.538
Sil+Areia	92.453	68.419	82.012	4.804
Sil+Arg	72.017	29.550	42.615	6.972
V _o	0.515	0.234	0.372	0.055
V ₁	0.255	0.017	0.063	0.052
θ ₋₃₃	0.381	0.130	0.240	0.050
θ ₋₁₀₀	0.369	0.121	0.225	0.050
θ ₋₅₀₀	0.179	0.087	0.131	0.024
θ ₋₁₅₀₀	0.135	0.057	0.099	0.019
Camada 20-30cm				
Ds	1.657	1.249	1.431	0.112
Pt	0.498	0.342	0.427	0.042
Macro	0.373	0.040	0.214	0.103
Micro	0.395	0.055	0.213	0.098
Areia	68.550	28.700	54.259	9.486
Argila	53.131	10.625	21.310	9.461
Silte	47.546	16.181	24.430	5.725
Sil/Arg	2.785	0.342	1.350	0.578
Sil+Areia	89.375	60.280	78.690	9.461
Sil+Arg	71.300	31.450	45.741	9.486
V _o	0.460	0.283	0.368	0.045
V ₁	0.168	0.018	0.058	0.033
θ ₋₃₃	0.355	0.146	0.245	0.054
θ ₋₁₀₀	0.339	0.136	0.231	0.050
θ ₋₅₀₀	0.228	0.070	0.140	0.038
θ ₋₁₅₀₀	0.198	0.054	0.109	0.033

Onde: Ds – densidade do solo (g.cm^{-3}), Pt – porosidade total (%), Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila (%), Silte – percentual de silte (%), Sil/Arg – relação do percentual de silte pela percentual de argila (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg- soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), V₁ – conteúdo de água extraído do solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ₋₃₃ – umidade do solo a tensão de -33 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ₋₁₀₀ – umidade do solo a tensão de -100 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ₋₅₀₀ – umidade do solo a tensão de -500 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ₋₁₅₀₀ – umidade do solo a tensão de -1500 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

4.1.3 Comparação entre os dados de solo utilizados para gerar e validar as funções de pedotransferência

Na Figura 5 é apresentada a relação entre os dados empregados para desenvolver e validar as funções de pedotransferência na camada de 0-20cm.

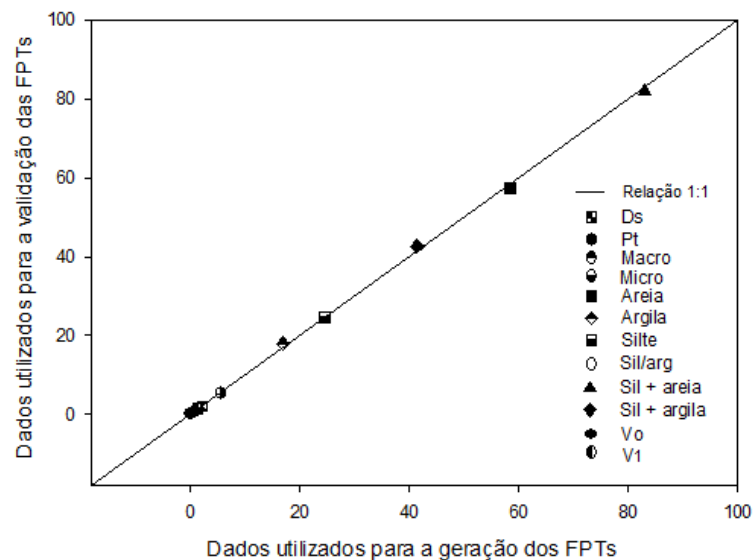


Figura 5 –Relação 1:1 dos atributos do solo utilizados para gerar e validar as FPTs na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Percebe-se que existe uma alta similaridade entre os dados usados para a geração e a validação das funções de pedotransferência, onde somente a variável areia se encontra levemente abaixo da reta 1:1. Contudo, apesar da variação dos valores de areia, os dados não apresentaram diferença significativa ao nível de 5% no teste “t” de amostras independentes.

Na Figura 6 temos a relação entre os dados empregados para desenvolver e validar as funções de pedotransferência na camada de 20-30cm.

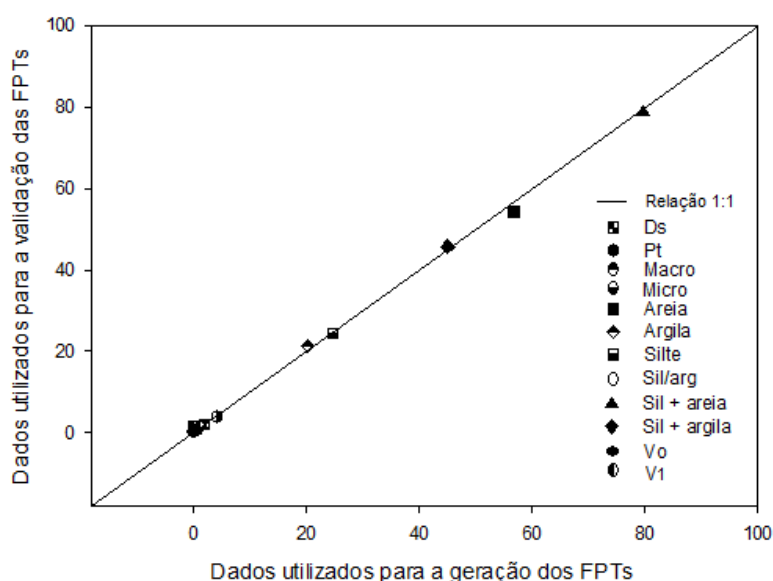


Figura 6 –Relação 1:1 dos atributos do solo utilizados para gerar e validar as FPTs na camada de 20-30cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Nota-se a evidência de uma elevada relação entre os dados usados para a geração e a validação dos funções de pedotransferência, estando somente a variável areia com seus valores médios abaixo dos utilizados para o desenvolvimento em relação aos dados médios de banco de dados utilizados para a validação.

4.2 Estimativa de retenção de água

Na Tabela 4 temos apresentadas as correlações entre as variáveis (densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, areia, argila, silte, relação silte por argila, soma dos percentuais de silte e areia, soma dos percentuais de silte e argila, volume de água retido no solo a tensão de -1kPa e volume de água remanescente no solo a tensão de -1kPa) e o conteúdo de água retido nos potenciais utilizados para a obtenção das funções de pedotransfêrencia.

As variáveis que apresentaram as maiores correlações com a tensão de -33kPa e -100kPa, na camada de 0-20cm, são as texturais (areia, silte e silte+arg), decrescendo com o aumento da tensão. O mesmo ocorre com os dados de V_o . Já a macro e a microporosidade exercem maior influência nas maiores tensões (-500 e -1500kPa).

Tabela 4 - Correlação de Pearson (r) entre as variáveis preditoras e a umidade retida em diferentes potenciais das amostras utilizadas para gerar as funções de pedotransferência para a bacia hidrográfica do arroio do Ouro.

Variável	θ -33 kPa	θ -100 kPa	θ -500 kPa	θ -1500 kPa
Camada 0-20cm				
Ds	-0.244	-0.275	-0.070	-0.019
Pt	0.303	0.361	0.224	0.163
Macro	0.081	-0.032	0.606	0.560
Micro	0.083	0.235	-0.519	-0.505
Areia	-0.614	-0.583	-0.329	-0.328
Argila	0.433	0.352	0.420	0.436
Silte	0.508	0.532	0.111	0.096
Sil/Arg	-0.034	0.016	-0.267	-0.284
Sil+Areia	-0.433	-0.352	-0.420	-0.436
Sil+Arg	0.614	0.583	0.329	0.328
V_o	0.480	0.478	0.308	0.288
V_1	-0.084	-0.012	-0.074	0.055
Camada 20-30cm				
Ds	-0.171	-0.190	-0.048	-0.001
Pt	0.428	0.431	0.371	0.314
Macro	0.022	-0.016	0.463	0.341
Micro	0.175	0.217	-0.317	-0.215
Areia	-0.648	-0.688	-0.464	-0.482
Argila	0.581	0.607	0.571	0.617
Silte	0.230	0.257	-0.049	-0.084
Sil/Arg	-0.332	-0.349	-0.518	-0.584
Sil+Areia	-0.581	-0.607	-0.571	-0.617
Sil+Arg	0.648	0.688	0.464	0.482
V_o	0.628	0.614	0.427	0.376
V_1	-0.084	-0.012	-0.074	-0.134

Onde: Ds – densidade do solo (g.cm^{-3}), Pt – porosidade total (%), Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila (%), Silte – percentual de silte (%), Sil/Arg – relação do percentual de silte pela percentual de argila (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg- soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), V_1 – conteúdo de água extraído do solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ_{-33} – umidade do solo a tensão de -33 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ_{-100} – umidade do solo a tensão de -100 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ_{-500} – umidade do solo a tensão de -500 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ_{-1500} – umidade do solo a tensão de -1500 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

As variáveis que apresentaram as maiores correlações com a tensão de -33kPa e -100kPa, na camada de 0-20cm, são as texturais (areia, silte e silte+arg), decrescendo com o aumento da tensão. O mesmo ocorre com os dados de V_o . Já a macro e a microporosidade exercem maior influência nas maiores tensões (-500 e -1500kPa).

Na camada de 20-30cm as variáveis que apresentam maior relação também são as relacionadas à textura (areia, sil+arg, argila e silte+areia). O V_o exerce maior influência nessa camada, também decrescendo com o aumento das tensões.

4.2.1 Potencial matricial de -33kPa na camada de 0-20cm

Na Tabela 5 temos os atributos que foram significativos a 5% de probabilidade para determinar a pedofunção para a tensão de -33kPa. Nela é possível perceber que as variáveis que apresentam significância são Sil+Arg e V_o com os coeficientes angulares de, respectivamente, 0,00327 e 0,349. Assim, a função pode ser descrita da seguinte maneira (Equação 10):

$$\theta_{-33} = -0,0320 + 0,349 \cdot V_o + 0,00327 \cdot \text{Sil+Arg} \quad (10)$$

Tabela 5—Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -33kPa na camada de 0-20cm.

Variáveis	Coefficiente
Intersecção	-0,0320
Ds	ns
Pt	ns
Macro	ns
Micro	ns
Areia	ns
Argila	ns
Silte	ns
Sil/Arg	ns
Sil+Areia	ns
Sil+Arg	0,00327
V_o	0,349
V_1	ns
R²	0,680

Onde: Ds – densidade do solo (g.cm^{-3}), Pt – porosidade total (%), Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila (%), Silte – percentual de silte (%), Sil/Arg – relação do percentual de silte pela percentual de argila (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg- soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), V_1 – conteúdo de água extraído do solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

Como observa-se na Tabela 5, o valor de R^2 encontrado para a equação foi de 0,680, superior ao valor encontrado por Wang *et. al.* (2017) quando estimou valores da curva de retenção de água para solos arenosos, onde o R^2 foi de 0,5762.

Para verificar a adequação da FTP ao banco de dados é necessário realizar a análise de sua capacidade preditiva. Para tanto, deve-se gerar um novo conjunto de dados de umidade utilizando-se a nova equação proposta, de onde será

diagnosticada sua capacidade em estimar esses valores com o auxílio dos indicadores estatísticos.

Na Figura 7 temos apresentada a relação entre os dados observados e os dados estimados com a FPT.

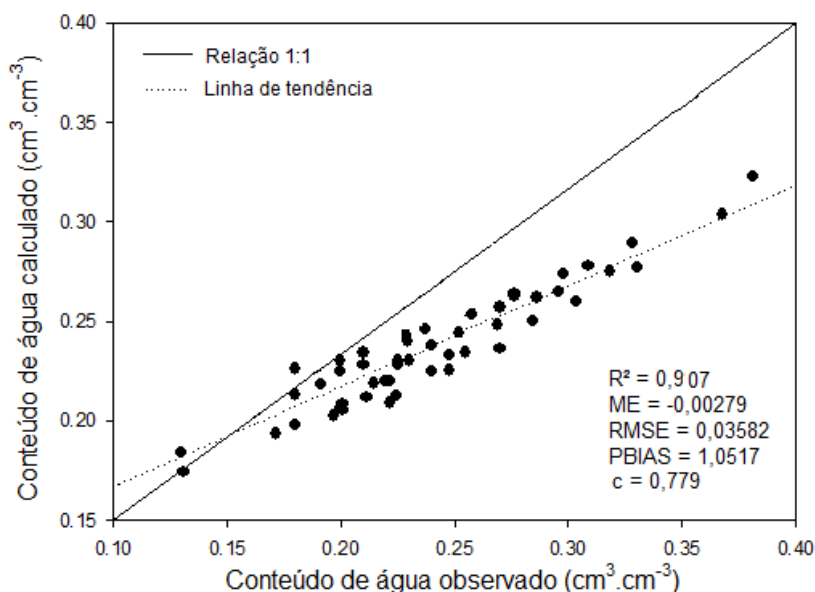


Figura 7 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -33kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Percebe-se na figura que o valor de R^2 encontrado foi de 0,907, o que indica que 90,70% da variação da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis preditoras. Também é possível perceber que o valor de ME, -0,00279, indica uma subestimativa dos valores de umidade que, comparando com a linha indicativa da relação 1:1, ocorre a partir do valor de $0,15\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. O valor do viés (PBIAS) foi de 1,0517%, corroborando a informação de que os resultados foram subestimados, mas estando na faixa de classificação “muito boa” ($|\text{PBIAS}| < 10\%$). O resultado de c (0,779) classifica o desempenho da FPT, tal qual o do indicador anterior, como “muito bom”.

4.2.2 Potencial matricial de -100kPa na camada de 0–20cm

Na tabela 6 temos os atributos que foram significativos a 5% de probabilidade para determinar a FPT para a tensão de -100kPa. Nota-se que as variáveis que apresentam maior significância são areia e V_o com os coeficientes angulares de,

respectivamente, -0,00286 e 0,336. Desse modo, a função pode ser descrita como na Equação 11:

$$\theta_{-100}=0,261-0,00286*Areia+0,336*V_o \quad (11)$$

Tabela 6 – Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -100kPa na camada de 0-20cm.

Variáveis	Coefficiente
Intersecção	-0,261
Ds	ns
Pt	ns
Macro	ns
Micro	ns
Areia	-0,00286
Argila	ns
Silte	ns
Sil/Arg	ns
Sil+Areia	ns
Sil+Arg	ns
V _o	0,336
V ₁	ns
R²	0,659

Onde: Ds – densidade do solo (g.cm⁻³), Pt – porosidade total (%), Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila (%), Silte – percentual de silte (%), Sil/Arg – relação do percentual de silte pela percentual de argila (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg- soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa (cm³.cm⁻³), V₁ – conteúdo de água extraído do solo a tensão de -1 kPa (cm³.cm⁻³).

Para verificar a adequação da FTP ao banco de dados é necessário realizar a análise de sua capacidade preditiva. Para tanto, deve-se gerar um novo conjunto de dados de umidade utilizando-se a nova equação proposta, de onde será diagnosticada sua capacidade em estimar esses valores com o auxílio dos indicadores estatísticos. Assim, na Figura 8 temos apresentada a relação entre os dados observados e os dados estimados com a FPT.

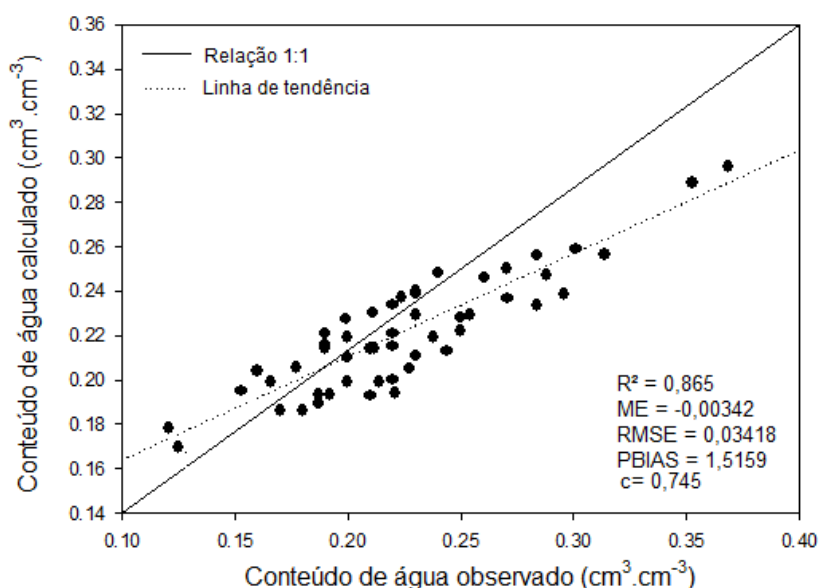


Figura 8 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -100kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Na figura 8 é possível observar que o valor de R^2 encontrado foi de 0,865, sinalizando que 86,50% da variação da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis preditoras. Também é possível perceber que o valor de ME, -0,00342, indica uma subestimativa dos valores de umidade que, comparando com a linha indicativa da relação 1:1, ocorre a partir do valor de $0,20\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. O valor de RMSE (0,03418) indica que houve uma dispersão dos valores em torno da reta. O valor do viés (PBIAS) foi de 1,5159%, corroborando a informação de que os resultados foram subestimados, mas estando na faixa de classificação “muito boa” ($|PBIAS| < 10\%$). O resultado de c (0,745) classifica o desempenho da FTP como “bom”.

4.2.3 Potencial matricial de -500kPa na camada de 0–20cm

Na tabela 7 temos os atributos que foram significativos a 5% de probabilidade para determinar a FPT para a tensão de -500kPa. Nela vemos que as variáveis que foram mais significativas para compor o modelo foram Macro, Micro, Sil+Areia e V_o . A equação pode ser descrita do seguinte modo:

$$\theta_{-500} = 0,312 + 0,0981 \cdot \text{Macro} - 0,0937 \cdot \text{Micro} - 0,00279 \cdot \text{Sil+Areia} + 0,119 \cdot V_o \quad (12)$$

Tabela 7–Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -500 kPa na camada de 0-20cm.

Variáveis	Coefficiente
Intersecção	0,312
Ds	ns
Pt	ns
Macro	0,0981
Micro	-0,0937
Areia	ns
Argila	ns
Silte	ns
Sil/Arg	ns
Sil+Areia	-0,00279
Sil+Arg	ns
V _o	0,119
V ₁	ns
R²	0,711

Onde: Ds – densidade do solo (g.cm^{-3}), Pt – porosidade total (%), Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila (%), Silte – percentual de silte (%), Sil/Arg – relação do percentual de silte pela percentual de argila (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg- soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), V₁ – conteúdo de água extraído do solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

Para conferir o quão adequada a FTP está ao banco de dados, é necessário realizar uma análise de sua capacidade preditiva. Para isso, gerou-se um novo conjunto de dados de umidade com o auxílio da nova FPT proposta, de onde foram estimados seus indicadores estatísticos. Na Figura 9 a seguir, observamos a relação entre os dados observados e os dados estimados pela a FPT.

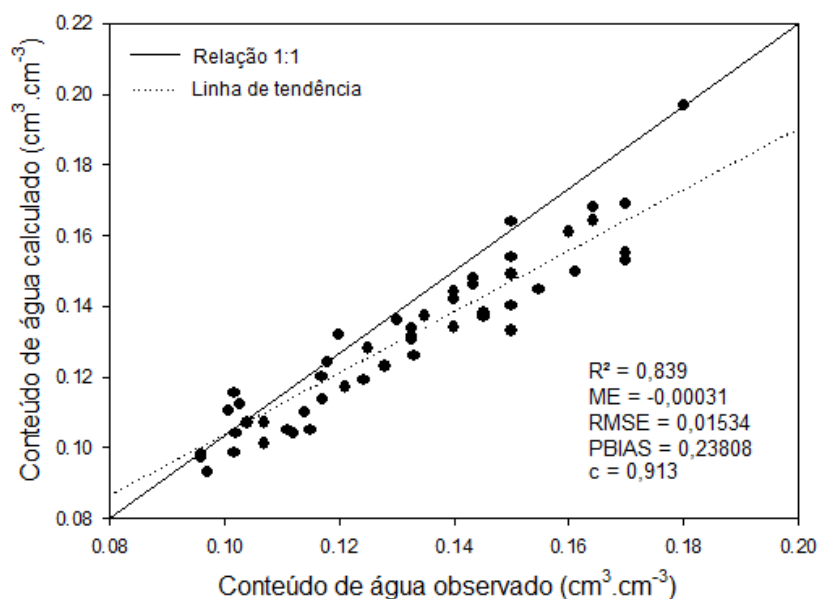


Figura 9 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -500kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro

Na Figura 9 é possível perceber que o valor de ME, -0,00031, indica uma subestimativa dos valores de umidade que, comparando com a linha indicativa da relação 1:1, ocorre a partir do valor de $0,10\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Também pode-se observar que o valor de R^2 encontrado foi de 0,839, sinalizando que 83,90% da variação da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis preditoras. O valor do viés (PBIAS) foi de 0,023808%, corroborando a informação de que os resultados foram subestimados, mas estando na faixa de classificação “muito boa” ($|\text{PBIAS}| < 10\%$). O resultado de c (0,913) classifica o desempenho da FTP como “ótimo”.

4.2.4 Potencial matricial de -1500kPa na camada de 0–20cm

Na Tabela 8 temos os atributos que foram significativos a 5% de probabilidade para determinar a FPT para a tensão de -1500kPa. Nela vemos que as variáveis que foram mais significativas para compor o modelo foram Micro, Argila e V_o , com coeficiente de -0,136, 0,00237 e 0,138. Deste modo, a equação pode ser descrita da maneira a seguir:

$$\theta_{-1500} = 0,0330 - 0,136 * \text{Micro} + 0,00237 * \text{Argila} + 0,138 * V_o \quad (13)$$

Tabela 8–Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -1500kPa na camada de 0-20cm.

Variáveis	Coefficiente
Intersecção	0,0330
Ds	ns
Pt	ns
Macro	ns
Micro	-0,136
Areia	ns
Argila	0,00237
Silte	ns
Sil/Arg	ns
Sil+Areia	ns
Sil+Arg	ns
V_o	0,138
V_1	ns
R^2	0,704

Onde: Ds – densidade do solo ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$), Pt – porosidade total (%), Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila (%), Silte – percentual de silte (%), Sil/Arg – relação do percentual de silte pela percentual de argila (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg- soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), V_1 – conteúdo de água extraído do solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

Para aferir adequação da FPT ao banco de dados, é necessário realizar uma análise de sua capacidade preditiva. Para isso, gerou-se um novo conjunto de dados de umidade com o auxílio da nova FPT proposta, de onde foram estimados seus indicadores estatísticos.

Na Figura 10 temos a relação entre os dados observados e os dados estimados pela a FPT.

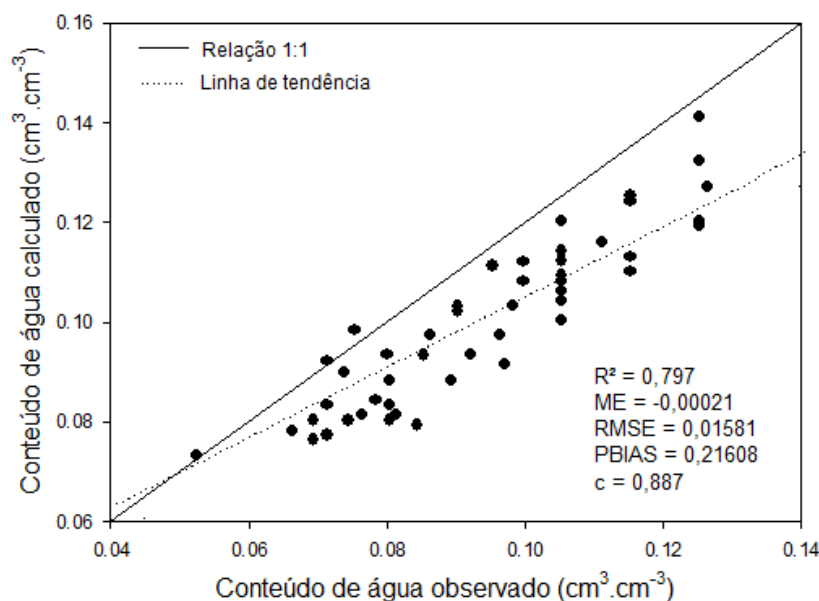


Figura 10 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -1500kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro

Observamos na Figura 10 que o valor de ME, -0,00021, indica uma subestimativa dos valores de umidade que, comparando com a linha indicativa da relação 1:1, ocorre a partir do valor de $0,05\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Também pode-se observar que o valor de R^2 encontrado foi de 0,797, sinalizando que 79,70% da variação da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis preditoras. O valor do viés (PBIAS) foi de 0,21608%, corroborando a informação de que os resultados foram subestimados, mas estando na faixa de classificação “muito boa” ($|\text{PBIAS}| < 10\%$). O resultado de c (0,887) classifica o desempenho da FPT como “ótimo”.

4.2.5 Potencial matricial de -33kPa na camada de 20–30cm

Na Tabela 9 temos os atributos que foram significativos a 5% de probabilidade para determinar a FPT para a tensão de -33kPa na camada mais

profunda do solo (20–30cm). A partir dela é perceptível que as variáveis que exerceram maior significância para compor o modelo foram Areia e V_o , com coeficiente de -0,00338 e 0,510, respectivamente, ficando a equação descrita da maneira a seguir:

$$\theta_{.33} = 0,235 - 0,00338 * \text{Areia} + 0,510 * V_o \quad (14)$$

Tabela 9–Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -33kPa na camada de 20-30cm.

Variáveis	Coefficiente
Intersecção	0,235
Ds	ns
Pt	ns
Macro	ns
Micro	ns
Areia	-0,00338
Argila	ns
Silte	ns
Sil/Arg	ns
Sil+Areia	ns
Sil+Arg	ns
V_o	0,510
V_1	ns
R²	0,788

Onde: Ds – densidade do solo (g.cm^{-3}), Pt – porosidade total (%), Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila (%), Silte – percentual de silte (%), Sil/Arg – relação do percentual de silte pela percentual de argila (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg- soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), V_1 – conteúdo de água extraído do solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

Para verificar a adequação da FTP ao banco de dados é necessário realizar a análise de sua capacidade preditiva. Para tanto, deve-se gerar um novo conjunto de dados de umidade utilizando-se a nova equação proposta, de onde será diagnosticada sua capacidade em estimar esses valores com o auxílio dos indicadores estatísticos.

Na Figura 11 temos apresentada a relação entre os dados observados e os dados estimados com a FPT.

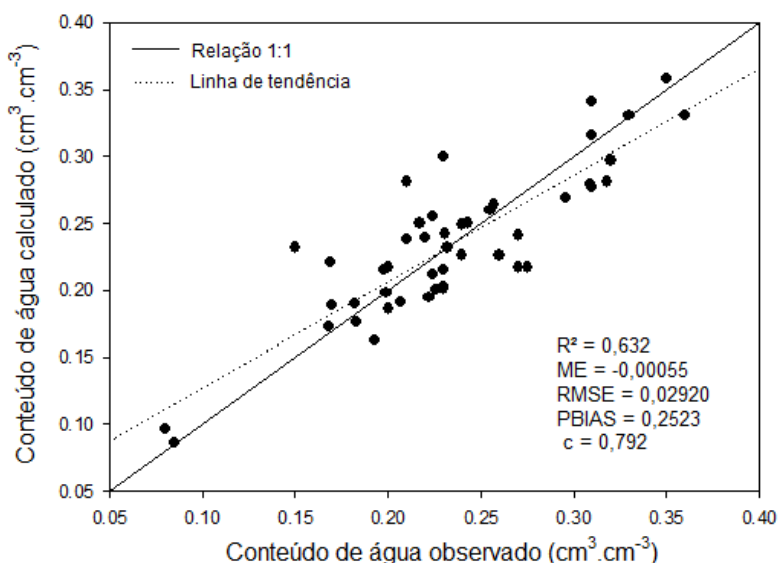


Figura 11 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -33kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Na Figura 11, temos que o valor de ME, -0,00055, indica uma subestimativa dos valores de umidade que, comparando com a linha indicativa da relação 1:1, ocorre a partir do valor de 0,25cm³.cm⁻³. Também pode-se observar que o valor de R² encontrado foi de 0,632, sinalizando que 63,20% da variação da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis independentes. O valor do viés (PBIAS) foi de 0,2523%, corroborando a informação de que os resultados foram subestimados, mas estando na faixa de classificação “muito boa” (|PBIAS|<10%). O resultado de c (0,792) classifica o desempenho da FTP como “muito bom”. O valor de RMSE (0,02920) indica uma suave dispersão dos valores.

4.2.5 Potencial matricial de -100kPa na camada de 20–30cm

Na Tabela 10 temos os atributos que foram significativos a 5% de probabilidade para determinar a FPT para a tensão de -100kPa. Nota-se que as variáveis que exerceram maior significância para compor o modelo foram areia, argila e V_o, com coeficiente de -0,00295, 0,00108 e 0,480, respectivamente, ficando a equação descrita da maneira a seguir:

$$\theta_{-100} = 0,190 - 0,00295 \cdot \text{Areia} + 0,00108 \cdot \text{Argila} + 0,480 \cdot V_o \quad (15)$$

Tabela 10–Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -100kPa na camada de 20-30cm.

Variáveis	Coefficiente
Intersecção	0,190
Ds	ns
Pt	ns
Macro	ns
Micro	ns
Areia	-0,00295
Argila	0,00108
Silte	ns
Sil/Arg	ns
Sil+Areia	ns
Sil+Arg	ns
V _o	0,480
V ₁	ns
R²	0,804

Onde: Ds – densidade do solo (g.cm^{-3}), Pt – porosidade total (%), Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila (%), Silte – percentual de silte (%), Sil/Arg – relação do percentual de silte pela percentual de argila (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg- soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), V₁ – conteúdo de água extraído do solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

Para verificar a adequação da FTP ao banco de dados é necessário realizar a análise de sua capacidade preditiva. Para tanto, deve-se gerar um novo conjunto de dados de umidade utilizando-se a nova equação proposta, de onde será diagnosticada sua capacidade em estimar esses valores com o auxílio dos indicadores estatísticos.

Na Figura 12 temos apresentada a relação entre os dados observados e os dados estimados com a FPT.

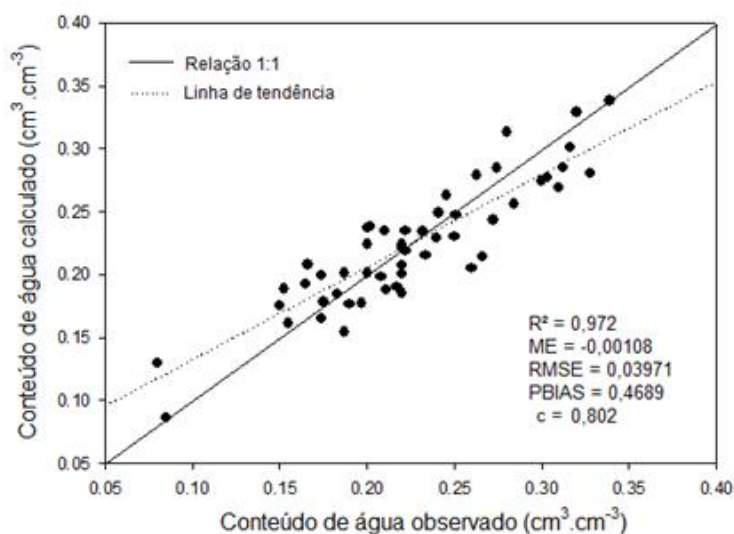


Figura 12 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -100kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Observa-se na Figura 12, que o valor de R^2 encontrado foi de 0,972, indicando que 97,20% da variação da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis independentes. Também vemos que o valor de ME, -0,00108, indica uma subestimativa dos valores de umidade que, comparando com a linha indicativa da relação 1:1, ocorre a partir do valor de $0,25\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. O valor do viés (PBIAS) foi de 0,4689%, corroborando a informação de que os resultados foram subestimados, mas estando na faixa de classificação “muito boa” ($|\text{PBIAS}| < 10\%$). O resultado de c (0,802) classifica o desempenho da FTP como “muito bom”. O valor de RMSE (0,03971) indica uma suave dispersão dos valores.

4.2.5 Potencial matricial de -500kPa na camada de 20–30cm

Na Tabela 11 temos os atributos que foram significativos a 5% de probabilidade para determinar a FPT para a tensão de -500kPa. Vemos que as variáveis que exerceram maior significância para compor o modelo foram argila (0,00251), V_o (0,168) e micro (0,146), sendo a equação descrita da forma a seguir:

$$\theta_{-500} = -0,00629 + 0,00251 \cdot \text{Argila} + 0,168 \cdot V_o + 0,146 \cdot \text{Micro} \quad (16)$$

Tabela 11 – Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -500kPa na camada de 20-30cm.

Variáveis	Coefficiente
Intersecção	-0,00629
Ds	ns
Pt	ns
Macro	ns
Micro	0,146
Areia	ns
Argila	0,00251
Silte	ns
Sil/Arg	ns
Sil+Areia	ns
Sil+Arg	ns
V _o	0,168
V ₁	ns
R²	0,724

Onde: Ds – densidade do solo (g.cm⁻³), Pt – porosidade total (%), Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila (%), Silte – percentual de silte (%), Sil/Arg – relação do percentual de silte pela percentual de argila (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg- soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa (cm³.cm⁻³), V₁ – conteúdo de água extraído do solo a tensão de -1 kPa (cm³.cm⁻³).

A relação entre os dados observados e calculados, bem como seus indicadores estatísticos, está representada na figura (Figura 13) a seguir.

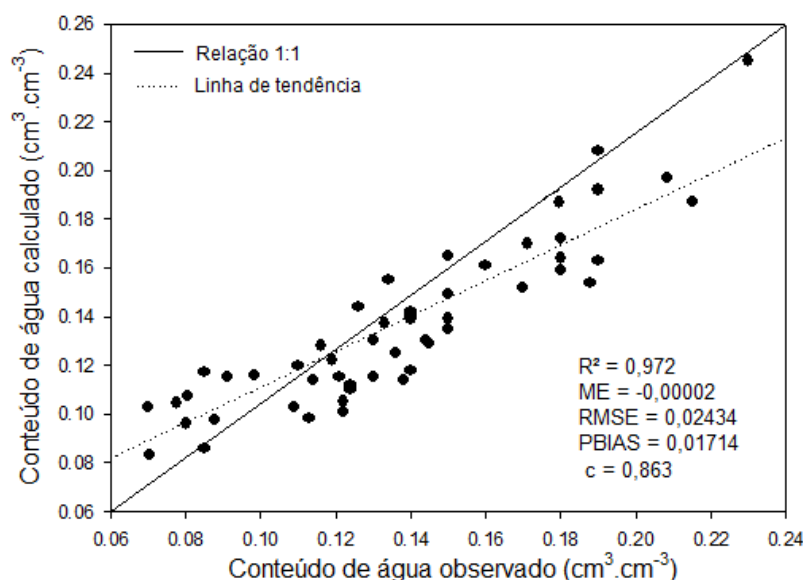


Figura 13 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -500kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro

Na Figura 13 é possível observar que o valor de R² encontrado foi de 0,972, indicando que 97,20% da variação da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis independentes. Temos também o valor do erro médio (ME= -0,00002) que, por ser negativo, indica uma subestimativa dos valores de umidade que,

comparando com a linha indicativa da relação 1:1, ocorre a partir do valor de $0,11\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. O valor do viés (PBIAS) foi de 0,01714%, concordando com a informação de que os resultados foram subestimados, mas estando na faixa de classificação “muito boa” ($|\text{PBIAS}| < 10\%$). O resultado de c (0,863) classifica o desempenho da FTP como “ótima”.

4.2.5 Potencial matricial de -1500kPa na camada de 20–30cm

Na Tabela 12 temos os atributos que foram significativos a 5% de probabilidade para determinar a FPT para a tensão de -1500kPa. Vemos que as variáveis que exerceram maior significância para compor o modelo foram Argila (0,00261) e V_o (0,153), ficando a equação descrita da seguinte maneira:

$$\theta_{-1500} = -0,00277 + 0,00261 * \text{Argila} + 0,153 * V_o \quad (17)$$

Tabela 12–Função de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -1500kPa na camada de 20-30cm.

Variáveis	Coefficiente
Intersecção	-0,00277
Ds	ns
Pt	ns
Macro	ns
Micro	ns
Areia	ns
Argila	0,00261
Silte	ns
Sil/Arg	ns
Sil+Areia	ns
Sil+Arg	ns
V_o	0,153
V_1	ns
R²	0,654

Onde: Ds – densidade do solo ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$), Pt – porosidade total (%), Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila (%), Silte – percentual de silte (%), Sil/Arg – relação do percentual de silte pela percentual de argila (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg- soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), V_1 – conteúdo de água extraído do solo a tensão de -1 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

Observa-se na Figura 14 a relação entre os dados observados e calculados, bem como seus indicadores estatísticos (R^2 , ME, RMSE, PBIAS e c).

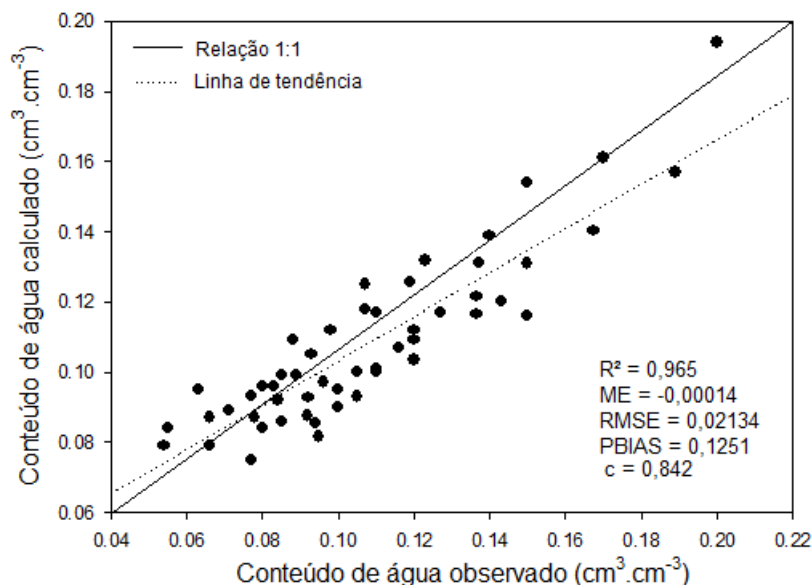


Figura 14 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -1500kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Na Figura 14 observa-se que o valor de R^2 encontrado foi de 0,965, indicando que 96,50% da variação da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis independentes. Temos também o valor do erro médio ($ME = -0,00014$) que, por ser negativo, indica uma subestimativa dos valores de umidade que, comparando com a linha indicativa da relação 1:1, ocorre a partir do valor de $0,08\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. O valor do viés (PBIAS) foi de 0,1251%, concordando com a informação de que os resultados foram subestimados, mas estando na faixa de classificação “muito boa” ($|PBIAS| < 10\%$). O resultado de c (0,842) classifica o desempenho da FTP como “muito bom”.

4.3 Análise dos erros das funções de pedotransferência

4.3.1 Estimativa da retenção de água na faixa de potenciais de -33 a -1500kPa na camada de 0-20cm

Na Tabela 13 temos os valores máximos e mínimos usados para validar as funções de pedotransferência. A partir dela é possível perceber que os atributos que apresentaram significância ao nível de 5% para os potenciais de -33 a -1500 kPa foram: Areia, Sil+Arg, Sil+Areia, Micro, Macro e V_o . Também vemos que os intervalos de aplicação das FPTs devem estar entre: 27,983 e 70,450%, para a

variável areia; 29,550 e 72,017% para Sil+Arg; 68,419 e 92,453% para Sil+Areia; 0,058 e 0,456cm³.cm⁻³, para Micro; 0,056 e 0,371cm³.cm⁻³, para Macro; e 0,234 e 0,515cm³.cm⁻³, para cm³.cm⁻³, para V_o.

Tabela 13–Variação dos dados utilizados para validar as funções de pedotransferência nos potenciais de -33 a -1500kPa na camada de 0-20cm.

Atributos	Conjunto de dados	
	Valor mínimo	Valor máximo
Areia	27.983	70.450
Sil+Arg	29.550	72.017
Sil+Areia	68.419	92.453
Micro	0.058	0.456
Macro	0.056	0.371
V _o	0.234	0.515

Onde: Macro – macroporosidade (%), Micro – microporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Sil+Areia – soma dos percentuais de silte e areia total (%), Sil+Arg- soma dos percentuais de silte e argila (%), V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa (cm³.cm⁻³),

Na Tabela 14 temos o valor do erro médio (ME) para cada potencial, assim como seu valor em lâmina (mm).

Tabela 14 – Erro médio (ME) e erro médio em lâmina de água armazenada (mm) para os diferentes potenciais na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Potenciais (kPa)	ME (cm ³ .cm ⁻³)	ME (mm)
-33	0.00252	0.50400
-100	0.00342	0.68400
-500	0.00031	0.06200
-1500	0.00021	0.04200

Na Tabela 14 foi possível observar que o maior valor de ME (0,00342cm³.cm⁻³) encontra-se no potencial de -100kPa ocasionando, conseqüentemente, uma maior lâmina (ME = 0,6840mm). Já na Tabela 15 temos os valores de lâmina média e seus respectivos percentuais (1, 3, 7 e 10%) para cada um dos potenciais.

Tabela 15 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para os diferentes potenciais e seus valores percentuais de 1, 3, 7 e 10% para a camada de 0-20cm.

Potenciais (kPa)	Lâmina média (mm)	Percentual lâmina média (mm)			
		1%	3%	7%	10%
-33	47.96	0.48	1.44	3.36	4.80
-100	45.08	0.45	1.35	3.16	4.51
-500	26.12	0.26	0.78	1.83	2.61
-1500	19.84	0.20	0.60	1.39	1.98

Quando comparamos os valores em lâmina do erro médio (Tabela 14) com os potenciais de lâmina armazenada em cada potencial, podemos perceber que erro médio do potencial de -100kPa é menor do que 3% do valor de lâmina média encontrada pra essa camada, bem como para os potenciais de -33, -500 e -1500kPa, indicando uma boa estimativa da umidade do solo com a utilização das FPTs geradas.

Na Figura 15 temos a relação entre os dados observados e calculados, a partir das FPTs, para a totalidade dos valores nos potenciais de -33 a -1500kPa, bem como de seus indicadores estatísticos (R^2 , ME, RMSE, PBIAS e c).

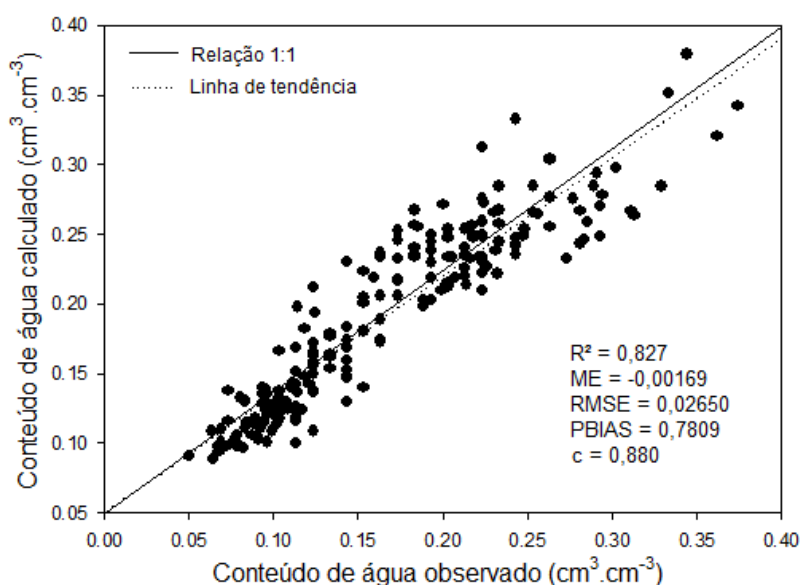


Figura 15 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -33 a -1500kPa na camada de 0-20cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Na Figura 15, observamos que o valor de R^2 encontrado foi de 0,827, indicando que 82,70% da variação da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis independentes. Temos também o valor do erro médio (ME= -0,00169) que, por ser negativo, indica uma subestimativa dos valores de umidade. O valor de RMSE, 0,02650, indica dispersão dos dados. O valor do viés (PBIAS) foi de 0,7809%, concordando com a informação de que os resultados foram subestimados, mas estando na faixa de classificação “muito boa” ($|PBIAS| < 10\%$). O resultado de c (0,88) classifica o desempenho da FTP como “ótima”.

Na Tabela 16 encontra-se a lâmina média para a faixa potencial de -33 a -1500kPa.

Tabela 16 – Lâmina média de água armazenada, obtidas em laboratório, para o intervalo de -33 a -1500kPa e seus valores percentuais de 1, 3, 7 e 10% para a camada de 0-20cm.

Potencial (kPa)	Lâmina média (mm)	Percentual lâmina média (mm)			
		1%	3%	7%	10%
-33 a -1500	34.75	0.3348	1.0044	2.3436	3.348

Convertendo o valor do ME (-0,00169) em lâmina, temos um valor de ME = 0,0338mm, sendo menor que 3% do valor da lâmina média, indicando uma boa acurácia do modelo em estimar os valores de umidade nessa faixa de potencial.

4.3.2 Estimativa da retenção de água na faixa de potenciais de -33 a -1500kPa na camada de 20-30cm

Na Tabela 17 são encontrados os valores máximos e mínimos usados para validar as funções de pedotransferência. A partir dela é possível perceber que os atributos que apresentaram significância para os potenciais de -33 a -1500kPa foram: Areia, Argila, Macro e V_o . Também vemos que os intervalos de aplicação das FPTs devem estar entre: 28,700 e 68,550%, para a variável areia; 10,625 e 53,131% para Argila; 0,040 e 0,373cm³.cm⁻³, para Macro; e 0,283 e 0,460cm³.cm⁻³, para V_o .

Tabela 17 – Variação dos dados utilizados para validar as funções de pedotransferência nos potenciais de -33 a -1500kPa na camada de 20-30cm.

Atributos	Conjunto de dados	
	Valor mínimo	Valor máximo
Areia	28.700	68.550
Argila	10.625	53.131
Macro	0.040	0.373
V_o	0.283	0.460

Onde: Macro – macroporosidade (%), Areia – percentual de areia total (%), Argila – percentual de argila V_o – conteúdo de água remanescente no solo a tensão de -1 kPa (cm³.cm⁻³),

Observa-se na Tabela 18, o valor do erro médio (ME) para cada potencial, assim como seu valor em lâmina (mm) para os potenciais de -33, -100, -500 e -1500kPa.

Tabela 18 – Erro médio (ME) e erro médio em lâmina de água armazenada (mm) para os diferentes potenciais na camada de 20-30cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Potenciais (kPa)	ME (cm ³ .cm ⁻³)	ME (mm)
-33	0.00055	0.0550
-100	0.00108	0.1080
-500	0.00002	0.0020
-1500	0.00014	0.0140

Também na Tabela 18 foi possível perceber que o maior valor de ME ($0,00108\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) encontra-se no potencial de -100kPa levando a um maior valor de ME em lâmina ($\text{ME} = 0,1080\text{mm}$). Já na Tabela 19 encontram-se os valores de lâmina média e seus respectivos percentuais (1, 3, 7 e 10%) para cada um dos potenciais.

Tabela 19 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para os diferentes potenciais e seus valores percentuais de 1, 3, 7 e 10% para a camada de 20-30cm.

Potenciais (kPa)	Lâmina média (mm)	Percentual lâmina média (mm)			
		1%	3%	7%	10%
-33	47.40	0.474	1.422	3.318	4.74
-100	44.40	0.444	1.332	3.108	4.44
-500	21.60	0.216	0.648	1.512	2.16
-1500	19.40	0.194	0.582	1.358	1.94

Comparando as tabelas 18 e 19 podemos perceber que erro médio do potencial de -100kPa é menor do que 1% da lâmina encontrada pra essa camada, tal qual para os potenciais de -33 , -500 e -1500kPa , indicando uma boa estimativa da umidade do solo com a utilização das FPTs geradas.

Na Figura 16 encontra-se a relação entre os dados observados e calculados, a partir das FPTs, para a totalidade dos valores nos potenciais de -33 a -1500kPa , bem como de seus indicadores estatísticos (R^2 , ME, RMSE, PBIAS e c).

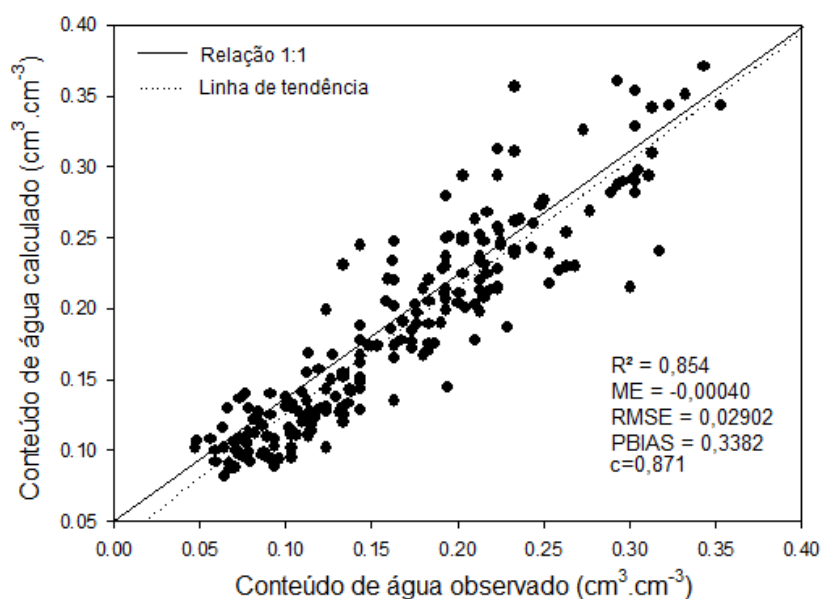


Figura 16 – Comparação entre valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -33 a -1500kPa na camada de 20-30cm na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Na Figura 16, observamos que o valor de R^2 encontrado foi de 0,854, indicando que 85,40% da variação da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis independentes. E também o valor do erro médio (ME= -0,00040) que, por ser negativo, indica uma subestimativa dos valores de umidade. O valor de RMSE, 0,02902, indica dispersão dos dados. O valor do viés (PBIAS) foi de 0,3382%, concordando com a informação de que os resultados foram subestimados, mas estando na faixa de classificação “muito boa” ($|PBIAS| < 10\%$). O resultado de c (0,871) classifica o desempenho da FTP como “ótima”.

Na Tabela 20 temos a lâmina média para a faixa potencial de -33 a -1500kPa. Convertendo o valor do ME (0,00040) em lâmina, temos um valor de ME = 0,040mm, sendo menor que 1% do valor da lâmina média, indicando uma boa acurácia do modelo em estimar os valores de umidade nessa faixa de potencial.

Tabela 20 – Lâmina média de água armazenada, obtidas em laboratório, para o intervalo de -33 a -1500kPa e seus valores percentuais de 1, 3, 7 e 10% para a camada de 20-30cm

Potencial (kPa)	Lâmina média (mm)	Percentual lâmina média (mm)			
		1%	3%	7%	10%
-33 a 1500	17.89	0.18	0.54	1.25	1.79

5 Conclusões

- As variáveis que melhor explicaram as variações na capacidade de retenção de água no solo foram areia, argila, sil+arg, sil+areia, macro, micro e V_o , sendo as variáveis areia, macro e V_o significativas nas duas camadas de profundidade.
- Os valores de erro médio (ME) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) encontrados para todas as funções foram próximos a zero; os valores de viés (PBIAS) encontrado foram inferior a 10% para todas pedofunções desenvolvidas, enquadrando-as na categoria de desempenho “muito boa”; e os valores de coeficiente de desempenho (c) variaram entre >85 e ≥ 66 , classificando as funções em “ótima”, “boa” e “muito boa”.
- O erro médio em lâmina encontrado para todas as situações foi inferior a 3% do total da lâmina média para os diferentes potenciais.
- As quatro funções de pedotransferência desenvolvidas, para os potenciais de -33, -100, -500 e -1500kPa, em cada camada, 0-20cm e 20-30cm, apresentaram desempenho satisfatório, possibilitando a sua utilização para construção da curva de retenção de água no solo para os solos da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Assim, a hipótese inicial do presente estudo é dada como aceita.

Referências

ANGERMANN, L. et al. Form and function in hillslope hydrology: characterization of subsurface flow based on response observations. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 21, n. 7, p. 3727–3748, 2017. Disponível em: <<https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/3727/2017/>>

BARBOZA, F. S. **Funções de pedotransferência para os solos do sul do Uruguai**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria – RS, 2011, 95 p.

BARTELS, G. K. **Monitoramento hidrossedimentológico numa bacia hidrográfica do Escudo Sul-Rio-Grandense**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, 2015, 87 p.

BAYAT, H.; MAZAHARI, B.; MOHANTY, B. P. Estimating soil water characteristic curve using landscape features and soil thermal properties. *Soil & Tillage Research*, v. 189, 2019, p. 1–14.

BORTOLINI, D.; ALBUQUERQUE, J. A. Estimation of the Retention and Availability of Water in Soils of the State of Santa Catarina. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v.42, Viçosa, 2018.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**. New York, v. 9, 1989, p. 177-213.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. Prentice Hall, 14th ed. 2008. 965 p.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, 1997, p. 89-97.

COELHO, E. F.; CONCEIÇÃO, M. A.; SOUZA, V. A. B. Estimativa dos limites e da disponibilidade de água em função da densidade global e da textura do solo. **Revista Ceres**. Viçosa, v. 45, 1998, p 183-192.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetada pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.3, 2003, p.527-535.

CUNHA, N.G.; SILVEIRA, R.J.C.; SEVERO, C.R.S. **Estudo dos solos do município de Morro Redondo**. EMBRAPA-CPATC, Ed. UFPel, Pelotas - RS, 1996, 28 p.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

ENGBALL, B.; HERGERT, G.W.; LESOING, G.W.; FERGUSON, R.B. Fractal analysis of spatial and temporal variability. **Geoderma**, 1999, p 249-272
EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

FILHO, J. F. M.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; CONCEIÇÃO, B. P. S. Curva de retenção de água elaborada pelo método do psicrômetro Para uso na determinação do índice “s” de qualidade física do solo. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.35, n.5, set./out. 2015, p.959-966,

GUARIZ, H.R.; CAMPANHORO, W. A.; PICOLI, M. H. S; CECÍLIO, A. R.; HOLLANDA, M. P. Variação da umidade e da densidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. In: **XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 2009. Natal. Anais... Natal: INPE, 2009, p. 7709-7716.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press, 1980, 413 p.

KAYSER, L. P. **Estimativa dos parâmetros de funções de pedotransferência para os solos do Rio Grande do Sul**. 2019. 85 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – UFSM, Santa Maria, RS.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ediupf, 2008, 212 p.

LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando a água disponível e resistência à penetração de Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**, Vol. 37, nº 4, Santa Maria, 2007, 66-69 p.

LIBARDI, P. L. Água no solo. In: VAN LIER, Q. de J. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2010. p. 103-152

MATULA, S.; MOJROVÁ, M.; SPONGROVÁ, K. Estimation of the soil water retention curve (SWRC) using pedotransfer functions (PTFs). **Soil and Water Research**, v. 2, n. 4, p. 113-122, 2007.

MESQUITA, M. G. B. F; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, n.3, mai-jun, 2004, p. 963-969.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, V. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa de retenção de água para alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**. v.40, n. 4, 2010, 848-853 p.

MINASMY, B.; BRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; SANTOS, H. G. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50p.

NEMES, A.; QUEBEDEAUX, B.; TIMLIN, D. J. Ensemble approach to provide uncertainty estimates of soil bulk density. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 6, 2010, p. 1938-1945.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Vol.3, 1968, p.197-200.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V.; MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, 2002, p. 315-323.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 12, 1988, p. 211-216

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. 2.ed. Barueri: Manole, 2012. 524p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, jul./dez. 2003, p. 29-48.

REICHERT, J. M. et al. Water balance in paired watersheds with eucalyptus and degraded grassland in Pampa biome. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 237-238, p. 282-295, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.014>>

SALCHOW, E.; LAL, R.; FAUSEY, N. R.; WARD, A. Pedotransfer functions for variable alluvial soils in southern Ohio. **Geoderma**, v. 73, mai. 1996, p. 165-181

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 355 p.

SANTOS, R. D. dos; LEMOS, R. C. de; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. rev. e ampl. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100 p.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. 2003. 108f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SIDLE, R. C. et al. Hydrogeomorphic processes and scaling issues in the continuum from soil pedons to catchments. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 175,

n. August, p. 75–96, 2017. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.010>>

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v.32, n. 1, Viçosa, Jan./Feb. 2008

SILVA, A. H.; FAVARETTO, N.; CAVALIERI, K. M. F.; DIECKOW, J.; VEZZANI, F. M.; PARRON, L. M.; CHEROBIM, V. F.; MARIOTI, J.; FERRARI NETO, H. Atributos físicos do solo e escoamento superficial como indicadores de serviços ambientais. In: _____. **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília: Embrapa, 2015, p. 71-83.

SOARES, F.C. **Uso de diferentes metodologias na geração de Funções de Pedotransferência para a retenção de água em solos do rio Grande do Sul**. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola. Universidade federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

SOARES, M. F. **Variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos e do carbono orgânico do solo de uma bacia hidrográfica de cabeceira em Canguçu - RS**. 2018. 102f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

SOUZA, E. D., FERNANDES FILHO, E. I., SCHAEFER, C. E. G. R., BATJES, N. H., SANTOS, G. R. D., & PONTES, L. M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia Agricola**.v. 73, n. 6,2016, p. 525-534

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation os soil water retention on brazilian soils. **Soil Society America Journal**, v. 64, 2000, p. 327-338.

VAN LIER, Q. D. J. Índice da disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000,p. 95–106.

VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ALMOND, J. G. Suitability os SWAT for the conservation effects assessment Project: A comparsion on USDA-ARS experimental watersheds. **Journal of Hydrologic Eng.** v.12, n. 2, 2007, p 173-189.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; DONNELL, J. O.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparision of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, 1985, p. 8995-9005.

WANG JP, HU N, FRANÇOIS B, LAMBERT P. Estimating water retention curves and strength properties of unsaturated sandy soils from basic soil gradation parameters. **Water Resour Res.**, v. 53, n. 7, 2017, p. 6069–6088.